

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高中物理学习词典



## 编者的话

《高中物理学习词典》是紧扣高中物理教学大纲规定的内容和要求编写的。共收录词目 500 条，释文力求简明扼要，重点突出，以利高中生理解物理知识，掌握科学方法和技能，提高运用物理知识分析问题和解决问题的能力。

本词典由北京师范大学中学教学研究中心主任阎金铎教授任主编，以特级教师和高级教师王杏村、梁敬纯、周誉蔼、胡祖康为核心，并聘请一批有教学经验的专家、教师魏义钧、梁增玉、阴家麟、杨进蔚、李世国、李锦萍等撰稿。根据编者多年的教学经验，对学生在学习过程中容易出现的疑点及易犯的错误，在相应的释文中都有明确的解释。具体来说，

对基本概念、基本规律和基本方法都专列词条进行详尽解释，并举例说明之；能联系实际的条目，都举了生产、生活中的实例，既巩固了基础知识，又拓宽了学生的眼界；本词典讲究实效，立足于帮助学生提高思维能力及解决实际问题的能力。我们期望本词典对高中学生学习物理有所帮助，并衷心地希望广大师生对本书提出修改建议，以期日臻完善。

编者

1993 年 9 月

## 前 言

为了配合我国的基础教育和九年制义务教育的推广普及工作，帮助中小學生更好地学习和掌握教学大纲规定的教学内容，给学生平时学习、做作业、复习和考试提供一套高质量有特色、方便实用并相对稳定的工具书，以利于全面提高学生的素质，我们在广泛调查，并征询教委领导部门意见的基础上，编写了《九年制义务教育暨高中学生系列学习词典》。本书按科设卷，其中小学四卷：语文、数学、自然常识、思想品德；初中、高中各九卷：语文、英语、政治、历史、数学、物理、化学、生物、地理，全书共计 22 卷，二万多个词条，七百万字。作为专门为学生而编写的与教学大纲、教材相配套的多卷系列学习词典，这在我国基础教育史上还是首创。本书是专为中小學生而编，处处考虑学生的实际需要。因此框架编排，收词范围紧扣国家教委颁布的新教学大纲，参照使用面广的各种版本教材。小学、初中各卷的编写侧重知识技能，注意全面提高学生的素质。条目的筛选不仅覆盖了教学大纲规定的全部知识，而且根据大纲的新精神，增加一定量的学习方法、学习新思路，以及联系社会生活、生产实际方面的词条。高中各卷还兼顾了高考的需要，收录了总复习、高考指导等方面的内容；释文

尽量做到科学性、启发性和实用性的统一。内容的纵深介绍针对小学、初中、高中学生的不同接受能力和学习特点，力求做到递次解析，深入浅出，重点知识还论及其发展过程，以利于学生的理解和运用；适度采用了部分有科学根据的新观点、新资料；文字表述力求简洁、鲜明、准确、生动；为便于学生按教学进度进行学习和查阅，目录按知识块分类设计，并比照大纲和教材的顺序，书后附有汉语拼音索引。

本书由全国人大常委、北京师范大学副校长许嘉璐任主编，各分卷主编大多为国家教委教材审查委员、专家学者。撰稿人都是学术上有造诣，对中学教学有研究的北京师范大学、北京教育学院、北京市教育局系统、北京海淀教师进修学院、北京市重点中小学以及其它部分省市的教授、副教授、高级教师、讲师、基础教育专家，共计 100 余人。几经运筹，勤奋笔耕，历一年半而成。我们衷心希望全国的中小學生以及老师和家长喜欢此工具书，诚恳希望读者在使用过程中给我们提出宝贵意见，以便通过不断修订再版，使之日臻完美，成为中小學生的良师益友。

总编委会

1993 年 9 月于北京



## 一、力学

机械运动机械运动是指物体与物体之间或物体各部分之间相对位置发生改变的过程，也可以说是物体在空间位置随时间作连续变化的过程。例如天体的运动、车船的运动、机器的转运、大气和河水的流动等等都是机械运动。机械运动是物质多种多样的运动形式中最简单而又最基本的一种。力学就是研究机械运动所遵循的客观规律的一门学科。

平动和转动是最简单的机械运动。物体的复杂运动一般都可以看成这两种运动的合成的结果。因此，平动和转动是物体的最基本的运动。

对于机械运动，我们可以从不同的角度来研究。如果只研究物体做机械运动的过程中位置随时间的变化关系，不涉及引起运动状态变化的原因，即只解决如何描述运动的问题，这是属于力学中运动学的内容。如果我们要进一步研究运动状态变化的原因，研究物体的运动与物体间相互作用之间的内在规律，这是属于力学中动力学的内容。在中学物理学习中，只有把动力学和运动学结合起来，才能很好地解决力学问题。

**参照物（系）** 为了确定物体的位置和描述其运动而选作标准的那个物体或物体系。

物体的位置只能相对于参照物来确定，同样，物体的速度和加速度也只能相对于参照物来确定，也就是说，将参照物当作静止的，来研究物体相对于参照物的运动。长期生活在地球上的人，自觉不自觉地把地球当作物体是否运动的参照物，久而久之，便形成了研究运动可以脱离参照物的错误观念，因此，认识参照物的意义和作用，对于正确理解物理概念和应用物理规律都是十分必要的。同一物体的运动情况，也就是说它的位移、速度和加速度等，从不同的参照物来看是不同的，例如，坐在教室里的人，以地球为参照物时，他的运动速度为零，处于静止状态；若以太阳为参照物时，则人随着地球围绕太阳运动，其速度约为 304 米/秒。绝对静止是没有的，宇宙间的一切物体都在运动，所以说运动是绝对的，静止是相对的。但是运动又只能相对参照物来描述，没有参照物就谈不上运动的描述。从这个意义上说运动也具有相对性。在运动学里，为了描述物体的运动，而不涉及到物体运动的原因，原则上可以选用任何物体作为参照物，但适当选择参照物，对研究运动的方便与否却有很大关系。值得注意的是：许多物理规律的成立条件都与参照物有关。例如，牛顿第一定律和第二定律、动量定理、动量守恒定律和动能定理等成立条件必须是对惯性参照物。所谓惯性参照物是指对牛顿第一定律成立的参照物。相对惯性参照物作匀速直线运动或静止的参照物也是惯性参照物。相对惯性参照物作加速运动的参照物叫做非惯性参照物。太阳是一个相当精确的惯性参照物，地球绕太阳运动是有加速度的，所以严格地说地球不是一个惯性参照物，但由于地球的加速度很小，在一般精度范围内，地球仍不失为一个相当好的惯性参照物。在研究地面上物体的运动时，除了专门研究地球自转所引起的力学现象外，一般都取地面作为惯性参照物。不少同学由于不注意参照物的正确选择，在解题时常常出现差错，比如把动量守恒定律应用到只有互相作用的物体系时，不仅应以惯性系为参照物，而且，物体系内各个物体还必须取同一个惯性参照物，例如，一质量  $M=100$  千克的船，停在静水中，船长  $l=3$  米，

一个质量是  $m=50$  千克的人站在船头，当人匀速地从船头走到船尾时，船后退的距离  $x$  为多少米？（不计水的阻力）常有

人错误地以船为参照物，得出人的速度  $v = \frac{3}{t}$ ，而以地为参照物，得出

船的速度为  $v' = \frac{x}{t}$ ，然后由动量守恒定律  $mv' + mv = 0$  求得  $x = 1.5$  米，

这里错误的原因，就是人和船不是同一个惯性参照物，若人和船都以地面

为参照物，就会得出船后退的距离为  $x = \frac{ml}{M+m} = 1.0$  米的正确答案。

对于运动学问题，选择参照物是可以任意的，如果选择适当，就可以起到化繁为简的效果。例如，A、B 两杆的长度相等，开始时 A 竖直悬在高空，B 杆竖直在地面，若在 A 杆自由下落的同时，使 B 杆以  $v_0$  的初速竖直上抛，在运动过程中，两杆始终竖直，并且从相遇到离开刚好用了时间  $t$ ，若不计空气阻力，求杆的长度  $L$ 。解答这个问题，若以地球为参照物，A 杆向下作加速运动，B 杆向上作减速运动，即时速度时刻在改变。A 杆的悬点高度没有给定，解答起来相当麻烦，若以 A 为参照物，则 B 杆的速度为  $v_0$ ，相对加速度为零，这样把两个变速运动转化为一个速度为  $v_0$  的匀速直线运动，两个等长的杆从相遇到分离，即走了两个杆长，用时

间为  $t$ ，所以每个杆长为  $L = \frac{v_0 t}{2}$ 。

**坐标系** 要精确地研究运动，就需要对运动有定量的描述，因此，为了在数量上表示一个物体相对于参照系的位置，我们以参照物为标准点（称为坐标原点），选定一组有一定次序的数（称为坐标），组成一个系统，称做坐标系。通常的坐标系有直线坐标系（一维）；平面直角坐标系（二维）；空间直角坐标系（三维）；极坐标系等等。如在研究竖直上抛运动的速度和时间的关系时，可选取平面直角坐标系，其中的一个坐标轴为速度（ $v$ ）轴，表示速度矢量的大小和方向；另一跟速度垂直的轴为时间（ $t$ ）轴，如图所示。0 点表示研究运动的起点。在运动学中，通常以物体的初速度为正方向建立坐标系；当初速为零时，则以运动方向为正方向建立坐标系；在动力学中，常以加速度方向为正方向建立坐标。例如，在研究质点做匀速圆周运动时，由于质点的加速度指向圆心，一般选取自然坐标系，即取指向圆心与加速度同向的法向坐标轴和取沿切线方向的切向坐标轴，组成的平面直角坐标系；在简谐振动中，习惯把坐标原点设在平衡位置上，沿振动方向选取一维直线坐标轴；在静力学中，建立直角坐标系时，坐标轴的取向，一般以少分解未知量为宜。

**矢量与标量** 一个物理量既要由大小，又要由方向才能完全确定，

并且遵从平行四边形运算法则，这样的物理量称为矢量。

两个矢量(a 和 b) 之和，是以这两个矢量为邻边组成的平行四边形，其夹角的对角线。

矢量减法是矢量加法的逆运算，一个矢量减去另一个矢量，相当于加上那个矢量的负矢量。即  $a-b = a+(-b)$ 。所以两个矢量(a 和 b) 之差为平行四边形的另一条对角线。

由矢量三角形，可以看到，二矢量之差的方向是指向被减矢量的。

在矢量运算中，有时为了简便，可建立直角坐标系，然后将各个矢量分解到各坐标轴上，这样就可以把矢量运算，变为代数运算。

**标量** 有些物理量，只由数值大小决定，不具有方向性，这样的物理量称为标量，标量的运算遵循一般的代数法则。如正负温度，正负重力势能；正负功；正负电荷等，它们都可以进行代数运算。但是要分清标量的正负号在不同情况下表示的意义是不同的。如有些正负号是表示物理量的数值；有些正负号则表示物理量的某种性质。

**平动** 物体在运动过程中，其上任意两点的连线在各个时刻的位置始终平行的运动。如升降机的运动，火车车厢的运动。

物体作平动，可以是直线运动，也可以是曲线运动，但物体上所有各点在任意时刻，都具有大小相等、方向相同的速度和加速度，在任意一段时间内，物体中所有质点的位移都是相同的，各点运动的轨迹也是相同的，并且相互平行。如图所示，薄板做曲线运动，其中任意两点所连成的直线始终与它的初始位置平行，所以薄板的运动属于平动。

由于物体做平动时其内部各点具有相同的运动特点，故物体任一点的运动可以代表整个物体的运动，所以物体平动时可将物体作为质点处理。

**转动** 如果物体的各部分在运动过程中都绕同一直线作圆周运动，这种运动叫做转动。这一直线称为转动轴。例如机械上齿轮的运动；地球自转等都是转动。如果转动轴是固定不动的，就称为有固定转轴的转动。有固定转轴的物体，如果处于静止状态或匀速转动状态时，则称之为平衡状态。如图所示为一有固定转轴为 ab 的球体。O 是任意一个转动平面和转动轴的交点，球体内所有质点分别在垂直于转轴的各个平面内作圆周运动，圆心都在转动轴上。如球体匀速转动，则球内各点都具有相同的角速度( )，但线速度( $v = \omega \cdot r$ )和向心加速度是不同的。假设图中所示为地球的自转，北京的纬度为  $\varphi = 39^\circ 56' 40''$ ，地球的平均半径约为 6370km。由于地球自转北京地区的转动半径为：

$$r = R \cos \varphi = 6.37 \times 10^6 \times 0.766 = 4.88 \times 10^6 \text{ (米)}$$

北京地区的物体随地面转动的线速度为：

$$v = \omega \cdot r = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi \times 4.88 \times 10^6}{24 \times 60 \times 60} = 355 \text{ (米/秒)}$$

物体的转动半径每秒钟转过的角度为：

$$\omega = \frac{2}{T} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ (弧/秒)}$$

$$= 4.17 \times 10^{-3} \text{ (度/秒)}$$

北京地区物体的向心力与万有引力之比：

$$\begin{aligned} \frac{F_{\text{向}}}{F_{\text{万}}} &= \frac{mv^2 / r}{GMm / R^2} = \frac{v^2 R^2}{GMr} \\ &= \frac{355^2 \times (6.37 \times 10^6)^2}{6.67 \times 10^{-11} \times 5.98 \times 10^{24} \times 4.88 \times 10^6} \\ &= 2.63 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

**质点** 当物体的形状和大小在所研究的问题中可以忽略时，把这个物体看成一个具有质量的几何点，这样的研究对象在力学中叫做质点。

实际上，物体都是有大小和形状的，但当物体的大小和形状与研究的问题或者无关或者关系很小，就可以把物体当作一个“质点”来处理。

当一个物体只做平动时，其内部各处的运动情况都相同，物体的运动状态就可以用一个点的运动状态来代替。因此可将这物体看成一个质点。

质点是个抽象的科学概念，它是人们为了科学研究的需要而引入的一个理想模型，其目的是为了突出研究问题的主要矛盾。是物理学中经常运用的一种研究问题的方法。在力学中，除了质点以外，刚体、理想流体等，都是理想模型。

**刚体** 物体中各点之间的距离在运动过程中或在其受力作用时，都保持各点之间的相对位置不变。即物体的形状、大小在任何情况下都不变。这样的物体叫刚体。绝对的刚体是不存在的，它是一种理想化的模型。由于任何物体在受力作用时，都要或多或少地形变。如放在桌面上的物体，物体和桌面都要产生形变。但是，如果形变的程度相对于物体本身的几何尺寸可以略去不计时，就可以把它看成刚体。这样做可以突出主要矛盾使研究对象大大简化，以便解决主要的问题。刚体的最简单的运动形式是平动和转动。当刚体的整体做平动时，组成刚体的每一个质点的运动情况都相同。

**时间与时刻** 时间是物质存在的一种客观形式，因为

物质是不断运动和变化的，这种运动和变化的持续性和顺序性就是由时间来标志的。

我们可以用一根无限长的带箭头的线来说明时刻和时间，这条线称做时间轴，其箭头只表示先后次序，时间轴的起点(0)叫做零时刻，是研究问题的起始时刻；时间轴上每一个点表示一个时刻，如第二秒初，第二秒末，前4秒末等等(如图所示)。时刻是衡量一切物质运动先后顺序所不可缺少的物理量，时刻没有长短，只有先后。时间轴上，用一段距离表示时间，第几秒，几秒内等都表示时间，时间是一个只有长短，没有方向的物理量。由时间轴可知时间和时刻的关系：时间=末时刻-初

时刻。

时间与物体的运动过程相对应，即与物体的位移和路程相对应；时刻与物体的一个运动状态相对应，和物体的位置相对应。

习惯上把短暂到几乎接近零的时间叫即时，也叫瞬时。但严格地讲，二者是有区别的，即时表示时刻，瞬时的含义是一段相当短的时间。

在国际单位制时，时间被定为基本量，时间的主单位是秒，通常所用单位还有分、时、日、年等。

任何周期性的过程，都可以用来测量时间，一天和一年的时间就是依据地球自转和公转来确定的。

**路程与位移** 质点在空间运动的轨迹的长度叫质点的路程。路程是标量，是描述物体在运动中实际经过的路径长短的物理量。一般来说路程并不反映物体位置改变的实际情况，质点由 A 点出发，可以经过不同路径达到 B 点，即同一个位置变化可以对应多个不同的路程。质点在空间运动，其位置变化叫做质点在这一运动过程中的位移。位移是矢量。几个位移的合成，遵循平行四边形法则。位移的大小由质点始末两点之间的距离决定，位移的方向则由质点的初位置指向末位置，用带有箭头的直线可表示。如质点由 A 经不同路径到 B 点，直线 AB 的长度即位移的大小，由 A 指向 B 的方向即是位移的方向。

位移并不表示质点通过的真实路径的长度，它所表示的是质点经过一段运动后，实际位置变化的总效果。在一般情况下，如非单向直线运动或曲线运动中，质点的路程不等于位移的大小。只有在单向直线运动中，质点通过的路程，才等于位移的大小。

**匀速直线运动** 在一条直线上运动的物体，如果在任何相等时间里通过的位移都相等的运动。做匀速直线运动的物体，它的位移跟时间成正比，即  $s \propto t$ ，所以它的数学表示式为  $s = v \cdot t$ 。其中  $v$  为比例恒量，称为匀速直线运动的速度。由于速度矢量是恒定的，即大小和方向都不变化，所以匀速直线运动可简称为匀速运动。

从运动学角度看，由于做匀速直线运动的物体速度大小和方向都不变化，所以它的平均速度和每一时刻的速度完全相同。

从动力学角度来看，做匀速直线运动的物体所受的合外力为零，其加速度为零，是在惯性支配下的运动。从能量角度看，质点做匀速直线运动时，其动能是不变的。

严格说，判断物体是否做匀速运动与我们测量工具精度有关。如当我们的秒表精度为 0.1 秒时，只要物体在每一个 0.1 秒时间内的位移都一样，我们就说物体在做匀速运动。至于在小于 0.1 秒时，物体是否做匀速运动，则是在另一个时间精度下来讨论的问题。

**速度** 运动物体的位移和发生这一段位移所用的时间之比，即位移对时间的变化率。它是描述物体运动方向和位置变化快慢的物理量。

速度是矢量，其方向跟位移方向一致。速度的单位在国际单位制中是米/秒。

学习速度概念时，要注意了解平均速度和即时速度的区别和联系；要注意区分即时速度和即时速率的不同，以及平均速度和平均速率的不同；要注意掌握各种不同性质运动的速度的特点，例如，匀速直线运动的平均速度和即时速度是相同的，因为匀速直线运动的特点是任何相等

时间内通过的位移是相同的。以上这些问题将在相应词条中专门论述。

**速率**速率是运动物体经过的路程  $s$  和通过这一路程所用时间  $t$  的比值。

速率是一个标量，它只描述物体运动的快慢，而不反映物体运动的方向。

当  $t$  较大时，比值  $\frac{s}{t}$  称为平均速率，平均速率与平均速度是不同的。如某学生围绕半径为  $R$  的圆形轨道从某处出发跑步，当第  $n$  次回到此处时，所用时间为  $t$ ，因为在时间  $t$  内位移为零，所以平均速度为零。而在时间  $t$  内路程是  $2nR$ ，所以它的平均速度为  $\bar{v} = \frac{2nR}{t}$ 。

当时间  $t$  趋近零时，比值  $\frac{s}{t}$  称为即时速率，可见即时速率和即时速度的大小是相同的，所以高中课本定义即时速度的大小为即时速率。

对于匀速直线运动，它的速度大小，速率值，平均速度大小，即时速度大小，即时速率都是一样的。

速率和速度都是描述质点运动快慢的物理量，它们的单位相同。但要注意两个概念是不同的。匀速直线运动的速度图象在平面直角坐标系中，用横轴表示时间，用纵轴表示速度，画出速度和时间关系的图象。简称速度图象。

**匀速直线运动速度的图象** 是一条与时间轴平行的直线，如图中的线段  $\overline{AB}$  和  $\overline{CD}$ 。速度越大，图象距时间轴越远，图象下的面积（带斜线部分）表示在相应时间（如 2 秒）内的位移。

速度图象是速度与时间的关系线，它只表示物体的运动规律，并不是质点的运动轨迹。作速度图象时，坐标轴必须标出单位，所求的物理量也

要在其数值后面标出相应的单位。如图中， $\overline{AB}$  表示物体做匀速直线运动，其速度为 2 米/秒，位移大小为 4 米，方向与规定的正方向是一致的。 $\overline{CD}$  表示做匀速直线运动的物体速度为 -3 米/秒，其位移大小为 9 米，方向与规定的正方向相反。

**匀速直线运动的位移图象** 在平面直角坐标系中，用横轴表示时间，用纵轴表示位移，画出位移和时间的关系图线。简称位移图象（如图所示）。

匀速直线运动的位移图象是一条通过坐标原点的倾斜直线。速度大小等于  $\theta$  角的正切值，即  $v = \tan \theta$ ，倾角  $\theta$  越大，表示做匀速直线运动物体的速度越大。对于以某一个速度运动的物体  $s = vt$ 。

从  $s-t$  图象中可以知道在时间  $t$  内通过的位移  $s$  所需要的时间  $t$ 。位移图象是位移和时间的关系图象，它只表示质点的运动规律，并不

是质点的运动轨迹。

**匀变速直线运动** 在变速运动中，当物体沿一直线运动，并且速度在任何相等时间内改变量都相等的运动。做匀变速直线运动的物体的速度和位移随时间的变化规律，可由下面一组基本方程表示：

$$v_t = v_0 + at$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

在匀变速直线运动中，加速度矢量是恒定的，或者说，物体所受的合外力是恒定的。

做匀变速直线运动的物体，它的即时速度是时间的一次函数；而位移是时间的二次函数。

在速度和位移公式中，共有 5 个物理量： $s, v_0, v_t, a, t$  只要知道其中三个就能求出另外两个量。另外， $s, v_0, v_t, a$  都是矢量，由于这几个矢量是共线的，所以它们的方向，在规定了正方向前提下，可用+、-符号表示。比如  $v_0 > 0$ 、 $a < 0$  表示  $v_0$  方向和规定的方向相同； $a$  的方向与规定的正方向相反。正方向规定原则上是任意的，在运动学中，习惯上规定以初速度方向为正方向，在动力学中，通常以加速度方向为正方向。

在上面公式所表示的运动规律中，当：

$v_0 = \text{常量}$   $a = 0$  时，表示匀速直线运动；

$v_0 > 0$   $a > 0$  时，表示匀加速直线运动；

$v_0 > 0$   $a < 0$  时，表示匀减速直线运动；

$v_0 = 0$   $a = g$  时，为自由落体运动；

$v_0 > 0$   $a = -g$  时，为竖直上抛运动；

$v_0 > 0$   $a = g$  时，为竖直下抛运动。

**平均速度** 在变速运动中，描述物体在某一段时间内运动方向和运动快慢的物理量，用  $\bar{v}$  表示，即  $\bar{v} = \frac{s}{t}$

如图所示，质点在  $t$  时间内，从 A 运动到 B 可以有不同路线，而它的平均速度大小只能是

$$\bar{v} = \frac{s}{t} = \frac{\overline{AbB}}{t}$$

平均速度是矢量，它的方向就是位移的方向。

平均速度一般不能表示物体真正运动的快慢和方向，而是物理学中一种简化问题的方法。也就是说，当我们研究物体的运动，但不必关心它的各个时刻（或位置）的运动情况时，就采用平均速度这种方法，来表示物体在这段时间内“好像”以这样的速度在运动，这种“好像”只能反映运动的总效果。

物体在某段时间内的平均速度，只适用于这一段时间内（或这段位移内），因为做变速运动的物体在不同时间内的平均速度不一定是相同

的，即平均速度与所取的时间有关。如一物体从 0 点沿 x 轴正方向运动，在任一时刻物体离 0 点的位移由方程  $x=8t-3t^2$  给定。那么物体在  $t=0$  到  $t=1$  秒时间间隔内的平均速度为

$$v_1 = \frac{x_1}{t} = \frac{5-1}{1} = 5 \text{ (米/秒)}$$

方向沿 x 轴正方向。而物体在  $t=0$  到  $t=4$  秒时间间隔内的平均速度大小是

$$\begin{aligned} \bar{v}_2 &= \frac{x_2}{t} = \frac{32-48}{4} \\ &= -4 \text{ (米/秒)} \end{aligned}$$

式中的负号表示 0—4 秒时间间隔内的平均速度沿 x 轴反方向。

平均速度，一般情况下，不等于速度的平均值，仅在匀变速直线运动时，平均速度才可以写成  $v = \frac{v_0 + v_t}{2}$ 。

在求解平均速度时，只需知道某时间间隔内的初末位置，并不需要知道物体的运动轨迹情况。

平均速率运动物体的路程跟时间的比值称为这段时间或这段路程的平均速率，记作：

$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

平均速率是标量，它只有大小，没有方向。平均速率的国际单位是米/秒。因为除单向直线运动外，其他轨迹的运动的的路程和位移是不相等的（如图所示），所以平均速率一般不等于平均速度的大小，即

$$\frac{|\vec{AB}|}{t} = \frac{AaB}{t}$$

实际上，对于曲线运动（如圆周运动）平均速度实际意义不大，因为方向是不能平均的。所以我们平时所说的汽车、轮船等交通工具的“平均速度”有多大，实质上是指“平均速率”的大小，只不过人们在日常用语中习惯于用“速度”，而不习惯于用“速率”这个词罢了。

**即时速度** 用以描述运动物体在各个时刻或各个位置运动快慢和方向的物理量。

当位移  $s$  或时间  $t$  趋近无限小时的平均速度的极限值称为即时速度。其表示式为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

即时速度的方向，是当  $t \rightarrow 0$  时的位移  $s$  的方向。当物体做直线运动时， $s$  的方向就是物体运动的方向。在曲线运动中，如图所示，物体由 a 点运动到 b 点，其平均速度方向由 a 指向 b。当  $t \rightarrow 0$  时，b 点趋近 a 点，这时  $s$  的方向就是 a 点在曲线上的切线方向。即 a 点的即时速度方向就是过 a 点的切线方向。

**加速度** 描述物体速度变化快慢和方向的物理量。如果物体的速度变化大而用的时间又短，则速度变化快，也就是加速度大，反之则小。可见，加速度是速度对时间的变化率。

加速度用速度变化和发生这一变化所用时间的比值来量度。因此，加速度的定义式为

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

当所取时间 ( $\Delta t$ ) 较长时，这一比值 ( $a$ ) 表示平均加速度；当所取时间趋于零时 ( $\Delta t \rightarrow 0$ )，这一比值 ( $a$ ) 的极限值表示即时加速度。对匀变速运动来说，加速度为恒量，其平均加速度和即时加速度是相等的。

要正确理解加速度概念，必须区分速度 ( $v$ )、速度的变化 ( $\Delta v$ ) 和速度对时间的变化率 ( $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ) 这三个不同概念。一个运动物体一定具有速度 ( $v$ )，但不一定具有加速度 ( $a$ )，因为加速度 ( $a$ ) 与速度 ( $v$ ) 无直接关系。只有物体的速度发生了变化 (有  $\Delta v$ )，才有加速度。而且加速度的方向和速度改变 ( $\Delta v = v_2 - v_1$ ) 的方向一致，但  $\Delta v$  大，加速度  $a$  不一定大，因为加速度大小不是由  $\Delta v$  这一个因素唯一决定，加速度是由速度的变化率 ( $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ ) 来决定和量度的。以上是从运动学角度的定义

式来理解加速度，要真正深刻理解加速度，还必须从产生加速度的原因上进行研究。根据牛顿运动定律，加速度是由力的作用所产生，而且加速度的方向与力的作用方向永远一致，对于一定的物体其加速度随着力的变化而变化。如果物体受一个恒力作用，其加速度就不变，即物体做匀变速运动。

例如，一个物体沿直线做匀变速直线运动。 $t_1$  时刻的速度为  $v_1$ ， $t_2$  时刻的速度为  $v_2$ ，则速度的增量： $\Delta v = v_2 - v_1$ 。如果  $v_2 > v_1$ ，则  $\Delta v$  和物体运动方向相同，物体加速度的方向和物体的运动方向相同，物体做匀加速直线运动；如果  $v_2 < v_1$ ，则  $\Delta v$  与物体运动方向相反，即加速度方向与物体的运动方向相反，则物体做匀减速直线运动。可见，加速度方向并不一定和速度方向一致。

又如，一个做平抛运动的物体，设有水平初速度为  $v_1$ ，因为物体是沿一条曲线运动，当物体通过某位置  $b$  时，设其速度为  $v_2$ ，其方向是曲线  $b$  点的切线方向，根据矢量法则： $\Delta v = v_2 - v_1$ ，可见  $v_2 = v_1 + \Delta v$ ，即  $v_2$  是  $v_1$  和  $\Delta v$  的矢量合成。根据三角形法则，可得矢量合成图， $\Delta v$  方向就是平抛物体的加速度方向。 $\Delta v$  反映了平抛运动物体的速度大小和方向的改变。所以  $\Delta v$  应该叫做速度矢量的增量。平抛运动是匀变速曲线运动，其加速度是重力加速度。 $\Delta v$  的方向和重力加速度的方向一致，竖直向下。

**平均加速度** 在变速运动中，设在时刻  $t$  到时刻  $t + \Delta t$  的过程中，物体的速度由  $v_1$  改变为  $v_2$ ，则物体在  $\Delta t$  时间内速度增量为  $\Delta v = v_2 - v_1$ ，那么比值  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  称为运动物体在时间  $\Delta t$  内的平均加速度： $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ 。

平均加速度是描述一段时间内总的速度变化快慢及方向的物理量。

平均加速度是矢量，它的方向由速度变化方向决定。如图所示，一质点做竖直上抛运动，向上和向下运动通过同一高度时，速度大小相等，方向相反，如取向上为正方向，则速度变化为

$$v = (-v) - (+v) = -2v$$

式中结论中的负号表示速度变化方向与规定正方向相反。若经历时间为  $t$ ，它的平均加速度为

$$\bar{a} = \frac{-2v}{t}$$

如果将匀变速运动学公式  $v = gt_{\text{下}}$  代入上式，并注意  $t = 2t_{\text{下}}$ ，则  $\bar{a} = -g$  这说明做竖直上抛运动的质点的平均加速度就是即时的重力加速度  $g$ 。

在匀变速运动中，无论是直线运动，还是曲线（如平抛运动）运动，其平均加速度就是即时加速度，它反映了质点在任何一段时间内速度变化快慢及方向都是一样的。在非匀变速直线运动中，它的平均加速度反映了一段时间内总的速度变化快慢及方向，而非匀变速曲线运动中的平均加速度是没有实际意义的。如图所示，做一般圆周运动的质点。从 A 点出发后，又回到 A 点，它的平均加速度是没有物理意义的。因为加速度是矢量，矢量是无法平均的。

平均加速度的国际单位是米/秒<sup>2</sup>。

**即时加速度** 在平均加速度表示式  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  中，当时间  $\Delta t$  很小，即当

$t + \Delta t$  趋近某一时刻时，物体运动的平均加速度的极限值，称为物体

在某一时刻的即时加速度，简称某时刻的加速度，即  $a_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$

即时加速度是用以描述物体在某一时刻或某一位置速度变化快慢和方向的，即时加速度是矢量。它的方向与速度变化方向（ $\Delta v$ ）是一致的。

由牛顿第二定律可知，对质量一定的物体的即时加速度的大小和方向由物体所受到的即时力决定，其变化规律完全由物体所受合外力变化来决定。如弹簧振子在振运过程中，合外力遵循  $F = -kx$  变化规律，其即时加速度也同样遵循这个变化规律：

$$F = ma = -kx \quad a = -\frac{k}{m}x$$

如图所示，当球 1 和球 2 处于静止状态时， $a_1=0$ （ $F_1=0$ ）， $a_2=0$ （ $F_2=0$ ）。当剪断绳子瞬间，弹簧还来不及变化。此时球 1（ $F'_1 = mg + F_{\text{弹}} = 2mg$ ）的加速度  $a'_1 = 2g$ 。球 2（ $F'_2 = mg - F_{\text{弹}} = 0$ ）的加速度  $a'_2 = 0$ 。

**匀变速直线运动公式** 匀变速直线运动有两个基本公式即：速度公式和位移公式：

$$v_t = v_0 + at$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

式反映了速度与时间的关系。式反映了物体的位置与时刻的关系或位移和时间的关系。由这两个公式还可以导出另外两个很有用的公式。由 两式消除  $t$  可得

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as$$

根据平均速度定义可得  $\bar{v} = \frac{s}{t} = \frac{v_0 t + \frac{1}{2} a t^2}{t} = v_0 + \frac{1}{2} a t = \frac{v_0 + v_0 + a t}{2}$

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}$$

由匀变速直线运动的基本公式可以得出一些特殊的规律：在初速度为零的匀加速直线运动中，由公式  $v_t = at$  可得出各秒末速度之比：

$$v_1 : v_2 : v_3 : \dots : v_t = 1 : 2 : 3 : \dots : t$$

由公式  $s = \frac{1}{2} a t^2$  可得出各秒末位移之比：

$$s_1 : s_2 : s_3 : \dots : s_t = 1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots : t^2 ;$$

也可得出每秒内位移之比：

$$s : s : s : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots : (2n-1) ;$$

做匀变速直线运动的物体，在各个相邻的相等时间的位移之差相等，即公式  $s = aT^2$ 。如  $s_1$ 、 $s_2$  为相邻的相等时间  $T$  的位移，由

$$s_1 = v_0 T + \frac{1}{2} a T^2$$

$$s_2 = v_1 T + \frac{1}{2} a T^2$$

$$v_1 = v_0 + aT$$

$$\text{可得 } s = s_2 - s_1 = aT^2$$

应用匀变速直线运动公式解题：

分析题意时，要特别注意对研究对象运动情况的分析，画出草图，并在草图上标明已知量和未知量。如自行车以 6 米/秒的速度匀速通过汽车站，再前进  $d=18$  米后，一辆汽车以 3 米/秒<sup>2</sup> 的加速度从汽车站出发追赶自行车。若问汽车在追上自行车之前，何时两车相距最远？解此问题时，要分析清楚两年运动情况的关系。汽车起动后速度由零增大，而自行车速度为恒定值，当汽车的速度小于自行车时，二车间的距离将越来越大。一旦汽车的速度增长到超过自行车速度时，两年距离才逐渐变小，可见两车速度相等时，两车相距最远。作位移草图如图所示，设汽车经  $t_1$  秒速度增长到 6 米/秒。由公式  $v=at$  或得

$$t_1 = \frac{v}{a} = 2 \text{ (秒)}$$

这时两车相距最远其大小为

$$s = d + s_1 - s_2 = d + vt_1 - \frac{1}{2} a t_1^2 = 24 \text{ (米)} \quad \text{解题时，要选择恰当的公$$

式，建立解题方程，在方程中尽量不要包含那些与已知量、未知量都无关的量，这样使解题将简便得多。如一物体做匀变速直线运动，从 A 到 B，已知  $v_A$  和  $v_B$ ，及 A、B 之间距离为  $s$ 。若求物体通过 AB 所用的时间，显

然应选择公式  $\bar{v} = \frac{s}{t} = \frac{v_A + v_B}{2}$  即

$$t = \frac{2s}{v_A + v_B} \text{ 最简便。}$$

匀变速直线运动的基本公式是矢量方程，其中  $s$ 、 $v_t$ 、 $v_0$ 、 $a$  都是在一条直线上的矢量，它们只有两种可能方向，所以解题时可规定一个正方向后，用正负号来表示已知量的方向，求解出的未知量为正，则表示其方向与所确定的正方向一致，反之相反。

**匀变速直线运动速度图象** 在平面直角坐标系中，用横轴表示时间，用纵轴表示速度，根据  $v_t = v_0 + at$  画出速度和时间的关系图线。

匀变速直线运动的  $v-t$  图象是一条倾斜的直线，如图所示。从  $v-t$  图象中可以知道：图象在速度轴上的截距是物体运动的初速度；如图中的初速度  $v_A = 4$  米/秒。从  $v-t$  图象可以直接求得，某一时刻的即时速度，或即时速度达到某一值时的时刻。如图中 B 点表示在时刻为 4 秒末时的即时速度  $v_B = 12$  米/秒。

从图象中可以求出运动物体的加速度大小，即加速度大小等于直线的

斜率  $a = \tan\alpha = \frac{v}{t}$ 。如图中所示的运动的加速度大小为  $a = \tan\alpha = 2$  (米/秒<sup>2</sup>)。

利用图象还可以求出物体在某段时间内的位移。即位移的大小等于  $v-t$  图线和对应的时间轴上线段所包围的面积。时间轴上方的面积表示正方向位移，下方的面积表示反方向位移，它们的代数和表示合位移。

除了利用  $v-t$  图象可求得速度、位移、加速度等量外，还可以运用图象来研究物体做匀变速直线运动的一些有特征性的规律。例如，物体做匀

变速直线运动的平均速度  $\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}$  可以利用图象求得，如图所示，当

面斜线的两三角形面积相等时 A 点的速度为平均速度。梯形 ( $\triangle O v_0 B t_1$ )

面积可以用矩形 ( $\square \bar{v} O t_1$ ) 面积代替，即  $v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = \bar{v} \cdot t$ ，所以  $\bar{v} = v_0 + \frac{1}{2}(v_t - v_0) = \frac{1}{2}(v_0 + v_t)$

从图中还可以得出，做“匀变速直线运动的物体中间时刻的即时速度

等于平均速度”这个重要结论，即  $v_{t/2} = \bar{v}$ 。

又例如，在图中，因时间间隔相等。图中所有小三角形面积都相等，所以，相等时间相邻位移差，正好是两个小三角形面积，即  $s = aT^2$

从图中，也很容易看出，1 秒内的位移相当于一小三角形面积，2 秒内位移相当于 4 个小三角形面积等。因此可以得出，在时间比为 1:1:1... 时，位移之比为 1:3:5.....(2n-1)。时间之比为 1:2:3... 时，位移之比为 1<sup>2</sup>:2<sup>2</sup>:3<sup>2</sup>... 总之利用  $v-t$  图象是研究物体运动规律的重要方法之

一。

匀变速直线运动位移图象在平面直角坐标系中，用横轴表示时间，用纵轴表示位移，根据  $s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$  所画出位移和时间关系图线。简称位移图象。

匀加速直线运动的  $s-t$  图象如图(1)所示：匀减速直线运动的  $s-t$  图象如图(2)所示。图(2)所示图线可用如下位移公式来分析：

$$s = v_0t - \frac{1}{2}at^2 = -\frac{a}{2}\left(t - \frac{v_0}{a}\right)^2 + \frac{v_0^2}{2a}$$

当  $t = \frac{v_0}{a}$  时，做匀减速物体位移为最大值， $s_m = \frac{v_0^2}{2a}$ 。

从  $s-t$  图象上，可以求出某段时间  $t$  内通过的位移  $s$ ；或通过某段位移  $s$  所用的时间；也可以求出某段时间（或位移）内的平均速度；还可以求出某一时刻（或位置）的即时速度。

从图(3)可以看出，在  $t$  时间内对应的位移为  $s$ ，它的平均速度  $\bar{v} = \frac{s}{t}$  等于割线的斜率。如果  $t$  趋近于零，割线AB与A点的切线重合，则可得出A点所对应时刻的即时速度（如图(4)所示）其大小为  $v_A = tga$

可以看出，在匀加速直线运动的  $s-t$  图线上，不同点的切线的斜率，沿曲线向上不断增大，也就是说即时速率不断增大。

图(5)中，交点P表示一个做匀速直线运动的物体和一个做匀加速直线运动的物体相遇或追赶上的时刻和位置。

图(6)所示，如取向上为正方向，a线表示竖直上抛运动上升过程的  $s-t$  图象。b线表示从同位置下抛运动的  $s-t$  图象。

自由落体运动 在地面上的物体只受重力作用，从静止开始下落的运动。

实验表明：在同一地点（即同纬度，同高度），在真空中任何物体，自由下落的加速度都一样，但在不同地点（不同纬度，不同高度），在真空中同一物体的自由下落加速度是不同的。

可利用牛顿第二定律和万有引力定律，在不考虑地球自转影响时，直接求得物体自由下落的加速度（即重力加速度）：

$$\text{由 } \frac{GMm}{r^2} = mg$$

$$\text{可得出 } g = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{(R+h)^2}$$

其中  $R$  为地球半径， $h$  为物体距地面的高度， $m$  为物体质量。当  $R > h$  时

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

式中重力加速度  $g$  的大小与物体的质量无关，可见，在同一地点（ $R$  一定），不同的物体重力加速度值是相同的。

由于地球不是一个严格的球体，所以不同地点  $R$  是不同的，故不同地点重力加速度值是不相同的。地球两极  $g$  值最大，赤道上  $g$  值最小。

在一般要求不太严格的计算中，加速度的大小和方向都可以认为是不变的，其方向是竖直向下，其大小记作  $g=9.8$  米/秒<sup>2</sup>。

自由落体运动是初速度为零的匀加速直线运动。自由落体的重力加速度是由重力所引起的。如果在空气中，由于空气的摩擦阻力作用，物体下落的加速度应由重力和空气阻力的合力来决定。

**竖直下抛运动** 以一定的初速度向地面竖直抛出一物体，物体只受重力作用的运动。

竖直下抛运动是加速度为  $g$  (重力加速度) 的匀加速直线运动。其运动学公式可以写成：

$$\begin{aligned} s &= v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \\ v_t &= v_0 + g t \\ v_t^2 &= v_0^2 + 2 g s \\ \bar{v} &= \frac{v_0 + v_t}{2} \end{aligned}$$

如节日燃放一种类似“双响”的炮竹，点燃时炮竹（可以看成质点）的 A 部分以速度  $v_1$ ；竖直向上抛出，B 部分则以速度  $v_2$  向相反方向，即竖直向下被抛出。当 B 部分刚好到达地面，与此同时 A 部分上升到最大高度并且爆炸。试求此炮竹应距地面多少高度时点燃？根据竖直上抛规律

$v_1 = v_0 - g t$  可得出  $t = \frac{v_1}{g}$ ，再由 式可计算出炮竹距地面高度  $h$ ， $h =$

$$v_2 t + \frac{1}{2} g t^2 = v_2 \cdot \frac{v_1}{g} + \frac{1}{2} g \left(\frac{v_1}{g}\right)^2 = \frac{v_1}{g} \left(v_2 + \frac{v_1}{2}\right)。$$

**竖直上抛运动** 物体以一定初速度沿竖直方向，向上抛出后，只受重力作用下的运动。

竖直上抛运动可分为两个阶段来研究，一个是上升过程，这时它的初速度和重力加速度  $g$  方向相反，是匀减速直线运动。上升到最高位置时，末速度为零，但加速度仍为  $g$ ，因此从这一时刻（最高位置）开始，它又将做自由落体运动（称为下落过程）。

由于物体在上升和下降过程中，加速度都是  $g$ ，即加速度的大小和方向都是恒定不变的，所以又可以把竖直上抛运动看做一个统一的匀变速运动来处理。如假定向上为正方向，则上抛任意时刻的位移由公式  $s = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$  计算， $s$  为正，表示物体在原抛出点上方，如为负时表示物体已下落到原抛出点的下方。同样，用公式  $v_t = v_0 - g t$  计算出的末速度，当  $v_t > 0$  时，表示物体向上运动， $v_t < 0$  时表示物体正在向下运动。

研究竖直上抛运动时，要注意其对称性特点：某一段上升所用的时间和同一段下落的时间相等。物体上升时经过某一高度时的即时速度大小与下落时经过该同一高度的即时速度大小相等（方向相反）。如图所示，我们把竖直上抛看成一整体来证明这个结论：物体由  $a$  点上升后，又回到  $a$  点时是位移  $s=0$ 。

$$\text{因为 } s = \bar{v} \cdot t = \frac{v_{\text{下}} + v_{\text{下}}}{2} \cdot t = 0$$

$$\text{所以 } v_{\text{上}} = -v_{\text{下}}$$

负号表示物体在 a 点的两个速度方向相反。

上升时间可由公式  $v_t = v_0 - gt$  求出：

$$t_{\text{上}} = \frac{v_{\text{上}} - v_2}{g} = \frac{v_{\text{上}}}{g}$$

$$\text{下落时：} t_{\text{下}} = \frac{v_{\text{下}} - v_t}{g} = \frac{v_{\text{下}}}{g}, \text{ 可见，} t_{\text{上}} = t_{\text{下}}。$$

竖直上抛运动的  $v-t$  图象如上图所示，三角形面积  $S_1$  为上升阶段的位移，取正值。三角形面积  $S_2$  为下落时的位移，取负值。如果物体回到抛出点，则合位移为零，即  $S_1 = S_2$ 。由图线可以看出：上升时间等于下落时间；抛出的初速度值和下落到抛出点的速度值相等。

解竖直上抛习题时，正方向的建立虽有任意性，但也要注意正负号问题容易出现错误。如，物体 A 从 80 米高处自由下落，与此同时，在它正下方的地面上以 40 米/秒的初速度竖直向上抛出物体 B。试分析二者经过多长时间在何处相遇？我们可以画出如图所示的位移关系图，设 A 下落了  $h_1$ ，B 上升了  $h_2$ ，为了保证  $H = h_1 + h_2$  中  $h_1$  和  $h_2$  的都是正值，我们规定正方向时，对于 A 应取向下为正，而对于 B 应取向上为正。

$$\text{因为 } h_1 = \frac{1}{2}gt^2$$

$$h_2 = v_0t - \frac{1}{2}gt^2$$

$$\text{所以 } h_1 + h_2 = \frac{1}{2}gt^2 + v_0t - \frac{1}{2}gt^2 = v_0t$$

$$t = \frac{H}{v_0} = 2(\text{秒})$$

$$h_2 = 60(\text{米})$$

即二者经历 2 秒相遇。当然在解此题前还要判断一下，两物体能否在空中相遇。通过分析计算可知，A 和 B 在空中运行时间都是 4 秒，因此 B 在上升到最高点以前便能与 A 相遇。

如果以 A 为参照物，则因 A、B 的加速度大小和方向相同，所以 B 对 A 的相对加速度为零，则 B 以  $v_0$  对 A 做匀速直线运动，那么 B 和 A 相遇时：

$$H = v_0t$$

$$t = \frac{H}{v_0} = \frac{80}{40} = 2(\text{秒})$$

可见选择合适的参照物，能使解题大为简化。

力物体和物体之间的相互作用。人们是通过受力物体发生形变，或受力物体的运动状态发生变化（即产生加速度）等效果来认识力。我国古代哲学家墨翟指出：“力，形之所以奋也”。这实质上是从动力学的角度给力下的定义。可见，我国古代学者们对力和运动的关系有比较深刻的认识。

力是物体间的相互作用，可见一个物体受到力的作用，必有其施力者，施力者可以通过物体之间直接接触而使受力者受到力的作用。例如物体之间由于互相拉、推发生了形变而产生弹力。施力者也可以不通过直接接触而通过“场”使受力者受到力的作用，如地球通过重力场对物体施以重力作用。总之，力的作用是离不开施力者的。这叫力的物质性。对物体进行受力分析时，要特别注意这一点。

力是物体间的相互作用，也就是说有受力者，必有施力者。同时，施力者必然同时受到受力者的力的作用。如果把受力者受到的力叫作用力，则施力者所受到的力就叫反作用力。可见力是成对的，即有作用力必有反作用力。这叫力的相互性。

物体受到力的作用所产生的效果，不但与力的大小有关，还跟力的作用方向和作用位置有关。所以，力的大小、方向和作用点（即作用位置）叫力的三要素。力的合成和分解完全遵从矢量平行四边形法则，所以力是矢量。总之，力的物质性，力的相互性和力的矢量性是一切真实力所共同具有的特征。

**力的分类方法** 在中学物理中，有各种各样的力的名称。归纳起来是从两个方面来分类的。

一类是根据力的性质来命名的，如重力、弹力、摩擦力、电场力、磁场力、分子力、核子力等等。这些力都具有自己的产生原因，其大小和方向各自遵循一定的规律。近代物理学研究表明，自然界一切实在的相互作用，按本质来说有四种基本形式，即万有引力，电磁力，强相互作用力，弱相互作用力。

另一类是根据力的作用效果来命名。如压力、支持力、张力、动力、阻力、向心力等，这些力可以是同种性质的力，如压力、支持力、张力实质上都是弹力。

如上图所示，一个物体放在斜面上，重力的两个分力  $F_1$  和  $F_2$  从性质上属于重力，但  $F_1$  的作用效果能使物体沿斜面下滑，所以又称  $F_1$  为下滑力。 $F_2$  的作用使物体与斜面相互作用挤压，于是斜面与物体之间产生弹力（ $N$  和  $N'$ ）， $N$  称为斜面对物体的支持力， $N'$  为物体对斜面的压力（效果力）。 $N$  和  $N'$  从性质上讲都属于弹力，而  $F_1$  和  $F_2$  从性质上讲属于重力，不能混为一谈。

要注意对物体进行受力分析时，不要把上述二类力混淆起来。

**重力** 重力是由于地球吸引而使物体受到的力。更确切地讲，重力是宇宙中所有其它物体作用在该物体上的万有引力的合力。

但是在地球表面的物体，地球引力比任何其他物体的引力要大得多，以致实际上可以把所有其他物体的引力忽略不计，从而认为重力只是由地球引力产生的。

重力并不等于地球对物体的引力。由于地球本身的自转，除了两极以外，地面上其他地点的物体，都随着地球一起，围绕地轴做匀速圆周运动，这就需要垂直指向地轴的向心力，这个向心力只能由地球对物体的引力来提供，我们可以把地球对物体的引力分解为两个分力，一个分力  $F_1$ ，方向指向地轴，大小等于物体绕地轴做匀速圆周运动所需的向心力；另一个分力  $G$  就是物体所受的重力（图示）其中  $F_1 = m \omega^2 r$ （ $\omega$  为

地球自转角速度， $r$  为物体旋转半径），可见  $F_1$  的大小在两极为零，随纬度减少而增加，在赤道地区为最大  $F_{1\max}$ 。

$$F_{1\max} = m \omega^2 R = 0.034m \text{ 牛顿}$$

在赤道地区物体受到的万有引力为

$$F_{\text{万}} = \frac{GMm}{R^2} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.976 \times 10^{24}}{6378.16^2 \times 10^6} \cdot m$$

$$= 9.79m \text{ 牛}$$

对质量为  $m$  千克的物体，在赤道地区，向心力跟万有引力之比为：

$$\frac{0.034m}{9.79m} = 0.00347$$

可见，物体的向心力是很小的，所以在一般情况下，可以认为物体的重力大小就是万有引力的大小，即在一般情况下可以略去地球转动的效果。

重力大小可以用测力计测量，物体对测力计的拉力或压力的大小就是重力的大小。

物体的重力是随在地球表面位置不同而不同的。当纬度降低时，由于万有引力减少（ $F_{\text{万}} = \frac{GMm}{R^2}$  中  $r$  增大）而向心力增大，所以实重随纬度减小而减小。物体的重力在同一地点随距地面高度增加而减少（距地面越高， $F_{\text{万}} = \frac{GMm}{r^2}$  中的  $r$  增加， $F = m \omega^2 r$  中的  $r$  也增加）。

重力的大小除可以用万有引力大小计算以外，还可以由牛顿第二定律  $F=ma$  计算，这时重力可以写成： $G=mg$ 。

重力是矢量，它的方向总是竖直向下的。在地球两极和赤道，它的方向和地球半径一致，在其他地区竖直方向近似沿地球半径方向，例如，北京地区的纬度为  $40^\circ$ ，其竖直方向跟地球半径方向夹角仅仅约  $0.1$  度。

如下图中的几何三角形  $OAB$  与力三角形是相似形，所以  $\frac{F_1}{F_{\text{万}}} = \frac{AB}{R}$ ，利

用 两式数据，粗略计算如下：

$$AB = \frac{F_1 R}{F_{\text{万}}} = 0.0034R$$

$$\text{tg } \angle AOD = \frac{AD}{OD} = \frac{R \sin 40^\circ}{R \cos 40^\circ - AB} = \frac{\sin 40^\circ}{\cos 40^\circ - 0.0034}$$

$$= \frac{0.6428}{0.7626} = 0.8429$$

$$\text{所以 } \angle AOD = 40.13^\circ$$

即北京地区重力方向与地球半径方向夹角为  $0.13^\circ$ 。此外，在埋有密度较大的矿石附近地区，物体的重力要比周围地区稍大些，利用重力的差异可以探矿，这种方法叫重力探矿。

**重心** 一个物体的各个部分都受到地球对它们的作用力的作用，这些力的合力就是物体的重力，这些合力的作用点就叫物体的重心。

质量分布均匀、形状规则物体的重心位置就在物体的几何中心处，如均匀球体的重心在它的球心。质量分布不均匀物体的重心位置除了跟

它的形状有关外，还与它的质量分布情况有关，例如起重机的重心随着提升重物质量和高度而变化。

一个物体的重心是个固定点，与物体的放置位置和运动状态无关；重心的位置也不一定在物体上，例如质量分布均匀圆环的重心位于圆环的圆心处。用实验——悬挂法可以找出质量不均匀或形状不规则物体的重心：将物体悬挂，并使其平衡，这时重力的作用点一定在悬线方向上，再换一个悬挂点，新的悬线也一定通过重心，前后两线的交点就是重心的位置。重心位置还可以利用转动平衡条件通过计算来求得。

**弹力** 发生形变的物体，在发生形变的同时，有恢复原状的趋势，因而对跟它接触的物体要产生力的作用，这种力叫做弹力。

弹力的产生条件：一是直接接触，二是发生弹性形变。如图(1)中，光滑球静止在 AOB 面上，且与二面都接触，可以断定：球与 AO 接触处无形变，因而就没有弹力产生，否则球将向右运动。

弹力大小的计算：可根据胡克定律，也可根据物体所遵守的运动规律和外界条件来计算。如图(2)中，A、B 两物体靠在一起，从斜面上由静止开始下滑过程中，它们之间是否存在弹力？弹力大小多大？已知  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 。

$\mu_1$ 、 $\mu_2$ 。

A、B 之间是否存在弹

力要由它们的加速度决定：当  $a_A = a_B$  时，就不存在弹力。当  $a_A < a_B$  时，它们一起下滑，要产生挤压，就会产生弹力。弹力大小可由牛顿第二定律得出。

弹力的方向与物体的形变方向相反（与恢复到原形状方向相同），且作用在相互接触的另一个物体上，如图(1)中，球与 OB 面相挤压，球产生压缩形变，弹力作用在 OB 面上，且垂直指向 OB 面。而 OB 面形变后产生的弹力作用在球上，方向向上与 OB 面形变方向相反。

如果两个接触物体，不存在接触面，只是点接触，这时弹力的方向，可以根据摩擦力方向来判断。因为摩擦力方向总是与其弹力方向垂直。如图(3)所示，A、B 两处的弹力是与墙面（或地面）垂直，还是与 AB 面垂直，我们可以这样分析：假设 AB 打滑，则 A 端沿墙面下滑，B 端沿地面右滑，从而可判断 A 端受的摩擦力沿墙面向上，B 端受的摩擦力水平向左，根据摩擦力与弹力垂直的关系，就可断定 A 端受的墙对它的弹力水平向右，B 端竖直向上。同理可判断图(5)中凹面上静止的棒 AB 两处弹力方向如图所示。

**胡克定律** 在弹性限度内，弹簧的弹力和弹簧的形变量（伸长或压缩值）成正比。写作：

$$F = k \cdot x$$

其中：“F”，表示弹簧的弹力，弹力是弹簧发生形变时对施力物的作用力。

“x”，是弹簧伸长或缩短的长度，注意“x”是以弹簧无形变时的长度为基准，即  $x = x' - x_0$  或  $x = x_0 - x'$ 。

“k”，叫弹簧的倔强系数，它描述单位形变量时所产生弹力的大小，k 值大，说明形变单位长时需要的力大，或者说弹簧“硬”。k 跟弹簧材料、长短、粗细等都有关系。k 的国际单位是牛/米。

如果将几个同样的弹簧串联或并联起来后，这个新的弹簧的倔强系数不再是原来的倔强系数。如图(1)所示，设两个倔强系数都是  $k$  的弹簧串联后的倔强系数为  $k_1$ ，则有  $F = k_1 \cdot x$ ，由于  $a$  点的弹力也为  $F$ ，所以对弹簧1可写成  $F = k \cdot \frac{x}{2}$ ，比较上面二式，可以得出： $k_1 = \frac{k}{2}$ 。又如图(2)所示，设两个倔强系数都是  $k$  原长相同的弹簧并联时的倔强系数为  $k_2$ ，则有  $F = k_2 \cdot x$ ，对弹簧1， $\frac{F}{2} = kx$ ，所以， $k_2 = 2k$ 。可见，串联后的弹簧倔强系数变小，并联后的变大。

弹力是一个变力，在弹簧的弹性限度内，弹力跟形变量成正比变化，其函数图象如图(3)所示。由图可知，其弹力对形变量的平均值为  $\bar{F} = \frac{1}{2} kx$ ，当将弹簧由无形变的原长拉到某一位置  $A$ ，要克服弹力做功，

这个功的大小等于弹簧在  $A$  点时的弹性势能，即

$$W = \bar{F} \cdot x = \frac{1}{2} kx^2$$

所以这时弹簧的弹性势能为

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2$$

**滑动摩擦力** 两个相互接触的物体，当有相对滑动时，在它们的接触面上，产生的阻碍相对运动的力。

滑动摩擦力是一种接触力，产生它的条件除二物体必须相互接触外，二物体还必须做相对运动。

滑动摩擦力的方向，平行于接触面，和相对接触面的滑动方向相反，如图(1)所示，在水平地面上相叠放的二物体，在力  $F$  作用下有相对滑动，若  $m_1$  相对  $m_2$  的运动方向向左，则  $m_1$  所受到的滑动摩擦力方向向右，即滑动摩擦力方向与相对运动方向相反。而此时  $m_1$  相对地的运动方向却是向右，但这个运动方向不是相对接触面的运动方向，因此与  $m_1$  的摩擦力方向是无关的。

滑动摩擦力的大小，跟相互接触物体材料及其表面的光滑程度有关；跟物体间的正压力有关；但和接触面积大小无关。它的计算公式为  $f = \mu N$ ， $\mu$  为滑动摩擦系数； $N$  是正压力。

滑动摩擦力是阻碍物体间的相对运动的，但不一定阻碍物体的运动，即在运动中也可以充当动力。如图(2)中，在光滑水平面上，一木块被子弹射入过程中，子弹跟木块之间产生一对摩擦力，木块所受摩擦力  $f'$  跟木块运动方向一致，但却阻碍木块相对子弹之间的相对运动（木块相对子弹向右运动）。

**滑动摩擦系数** 滑动摩擦力 ( $f$ ) 和接触物体之间的正压力 ( $N$ ) 之比。记作：

$$\mu = \frac{f}{N}$$

实验证明，滑动摩擦系数只跟相互接触物体的材料有关，跟两接触物体表面的光滑程度有关。当两个物体被确定后，滑动摩擦系数跟正压

力和滑动摩擦力都无关。

滑动摩擦系数跟两物体表面的关系，并不是表面越光滑，摩擦系数越小。实际上，当两物体表面很粗糙时，由于接触面上的峰和谷交错齿合，会使摩擦系数很大；对于非常光滑的表面，尤其是非常清洁的表面，由于分子力起主要作用，所以摩擦系数更大，表面越光洁，摩擦系数越大。但在力学中，常称“物体表面是光滑的”这是忽略物体之间的摩擦力的一种提法，实际上是一种理想化模型，与上面叙述毫无关系。

对金属，在大气中它们的摩擦系数一般都小于1，如果设法除掉金属表面的氧化层，则它的摩擦系数将会变得很大，这是属于接触表面原子之间引力作用的结果。

滑动摩擦系数（ $\mu$ ）是一个无单位的物理量，它能直接影响物体的运动状态和受力情况。

**静摩擦力** 两个物体相互接触，当有相对滑动的趋势，但又保持相对静止状态时，在它们接触面上出现的阻碍相对滑动的作用力。

产生静摩擦力的条件是：两物体必须接触；物体间要有挤压力；两物体要有相对运动趋势。静摩擦力的方向沿接触面的切线方向，与相对运动趋势方向相反，我们可以设想，当没有摩擦力存在时，根据物体之间相对运动方向，就可以判断出相对运动趋势的方向。

静摩擦力的大小，随外力的增加而增加，并等于外力的大小。但静摩擦力不能无限度的增大，而有一个最大值，当外力超过这个最大值时，物体就要开始滑动，这个最大限度的静摩擦力叫做最大静摩擦力（ $f_m$ ）。

实验证明，最大静摩擦力由公式  $f_m = \mu_0 N$  所决定， $\mu_0$  叫做静摩擦系数， $N$  为物体所受的正压力。摩擦力与外力关系如图(1)所示，a点坐标表示滑动摩擦力大小，它与外力大小无关。ob表示静摩擦力的范围，即  $0 \leq f_{静} \leq f_m$ ，b点坐标表示最大静摩擦力的大小。图线已显示出最大静摩擦力稍大于滑动摩擦力，在要求不太严格时，可以认为  $f_m = f_{滑}$ 。这时静摩擦系数等于滑动摩擦系数。

静摩擦力的大小和方向可以根据物体的运动状态求出，如图(2)所示，在水平力  $F$  作用下，质量为  $m_A$  和  $m_B$  的两个物体静止不动，如何确定它们的摩擦力大小和方向呢？可分析如下。对 A：在竖直方向只受重力和摩擦力，因为重力向下，由  $F_y = 0$ ；可知  $f_1$  必向上，并且  $f_1 = G_A$ 。对 B：物 A 对物 B 的静摩擦力为  $f_1'$ （ $f_1$  的反作用力），又  $G_B$  方向向下，由  $F_y = 0$  可知墙作用 B 物体的摩擦力  $f_2$  必向上。其大小为  $f_2 = f_1' + G_B = G_A + G_B$ 。

又如在水平地面上叠放二物体  $m_1$  与  $m_2$  之间的摩擦系数为  $\mu_1$ 。 $m_2$  和地面之间摩擦系数为  $\mu_2$ ，在水平力  $F$  作用下  $m_1$  和  $m_2$  之间相对静止还是相对运动？ $m_1$  在最大静摩擦力（可认为等于滑动摩擦力）作用下获得的最大加速度为：

$$a_m = \frac{\mu_1 m_1 g}{m_1} = \mu_1 g$$

若  $m_1$  和  $m_2$  相对静止，整体加速度

$$a = \frac{F - (m_1 + m_2)g\mu_2}{m_1 + m_2}$$

当  $a \leq a_m$  时,  $m_1$  和  $m_2$  处于相对静止状态, 它们之间的摩擦力是静摩擦力, 其大小为  $f = m_1 a$ , 但它们相对地面是以相同速度运动的。

当  $a > a_m$  时,  $m_1$  和  $m_2$  处于相对运动状态, 它们之间的摩擦力是滑动摩擦力, 其大小为  $f_{滑} = \mu m_1 g$ 。

**绳的受力分析** 当有外力作用于绳子使绳伸长时, 绳子内部之间产生弹力, 这种弹力的特点是只有当绳子伸长时才存在, 因此称此种弹力为张力。设绳子 AB 两端作用拉力  $F_1$  和  $F_2$ , C 为绳子上任一点(如图(1))。我们可以把绳看作是由 AC 和 BC 两部分组成, 显然 AC 和 BC 两部分之间有张力作用, 设此张力为  $T_C$ 。

在物理教学中, 考虑到绳的实际情况和研究问题所允许的近似, 常把绳作为两种理想化模型来处理。

一种情况是, 绳是轻绳, 其质量极小, 与问题中其它物体相比质量可以略去。如图(1)中, 设  $F_1 > F_2$ , 当绳运动稳定后即不再伸长时, 根据牛顿第二定律

$$\text{对 } m \text{ 有 } F_1 - F_2 = ma$$

$$\text{对 } m_1 \text{ 有 } F_1 - T_C = m_1 a$$

如果,  $m=0$  则有  $F_1 = F_2$ ,  $T_C = F_1 = F_2$ 。这就是说, 在力学问题中, 只要存在绳子质量可以略去的条件, 对于只在两端受力的绳来说, 尽管加速度不为零, 则这两个力一定相等, 而且绳子的张力也处处相等, 此张力等于绳子所受的外力。如图(2)所示, 一光滑定滑轮通过细绳挂两个质量为  $m_1=6$  千克、 $m_2=4$  千克的物体。求绳子的张力和物体系的加速度?

依题意绳的质量可以忽略不计, 所以绳子两端受到的力大小相等, 它们分别是  $T_1$  和  $T_2$  的反作用力(图中没有标出), 由牛顿第二定律(设  $T_1 = T_2 = T$ )

$$m_1 g - T = m_1 a$$

$$T - m_2 g = m_2 a$$

$$\text{解得: } a = \frac{m_1 g - m_2 g}{m_1 + m_2}$$

$$T = \frac{2m_1 m_2 g}{m_1 + m_2}$$

代入数据后:

$$a = 2 \text{ 米/秒}^2 \quad T = 48 \text{ 牛顿}$$

由上面各式可知, 绳子受力( $T$ 的反作用力)的大小由系统其它力决定(此处为重力); 只有当系统处于平衡状态时( $a=0$ ),  $T = m_1 g = m_2 g$ 。

由 式, 还可看出, 当质量不为零而加速度为零时,  $F_1$  也等于  $F_2$ , 并且绳子中各点张力也都等于  $F_1$  ( $F_2$ )。在静力学中, 力能传递就是基于这个道理。如图(3)所示, 在水平力  $F$  的作用下, 系统保持静止状态, 则各物体左右所受到的水平力大小都是  $F$ , “好像”力  $F$  能够传递。这实质上是由于加速度等于零的结果。若加速度不为零, 水平方向的力就一定不相等了。

第二种理想情况是假定绳子是刚性的, 刚性绳是指绳子的倔强系数  $k$

非常大，它只要有极微小的形变就可以产生足够大的弹力。因此刚性绳中的弹力可以在  $t = 0$  的时间内，能够产生突然变化（而弹簧中的弹力要发生变化，就需要有明显的形变，需要明显的不可忽略的时间，即弹簧的弹力不能够产生突变）。如图(4)所示，质量为  $m$  的小球，通过细绳 OB 和 OA 系着处于平衡，现突然将 AO 剪断，在剪断瞬间，OB 线上的张力为多少？题中，若绳子的质量比小球质量  $m$  小得多，可以忽略。剪断前，小

球受力情况如图(5)所示，OB绳受力  $T = \frac{mg}{\cos\alpha}$ 。如果绳是非刚性的，即

绳有形变。当 OA 剪断瞬间，OB 来不及形变，绳 OB 的张力应与没剪断

时一样。大小仍为  $T = \frac{mg}{\cos\alpha}$ 。如果假设绳子是刚性的，那么绳上的张

力则由系统中其它力和运动状态决定，由于剪断 OA 后，小球的运动状态要变化，因而绳 OB 受力就要变化。在无限小时间内，小球从静止状态转化为摆动状态，因而受力情况如图(6)所示，由牛顿第二定律

$$T - mg\cos\alpha = m\frac{v^2}{l} \quad (l = OB)$$

当  $t = 0$  时， $v = 0$

所以  $T = mg\cos\alpha$

可见，把绳子看成是刚性的或非刚性的模型，在剪断 OA 瞬间它受力的大小是不同的。

**杆的受力分析** 杆与绳的受力特点不同，由于杆既能发生纵向的拉伸或压缩形变，又能发生横向形变，所以杆对物体的作用既可以是沿杆方向的拉力或推力，也可以是在其它任意方向上的弹力。如果把杆视为刚体，则杆的弹力可以发生突变。杆对物体的作用力往往需要根据杆或连接在杆上的物体所受到的其他力的情况及运动状态来确定。

杆的运动既可以是平动，又可以是转动，在共面力系作用下，杆处于平衡状态的充分必要条件为  $F = 0$ ，在正交坐标中也可以写作

$$F_x = 0 \quad F_y = 0$$

$$M = 0 \text{ 或}$$

$$M_{\text{顺时针}} = M_{\text{逆时针}}$$

如果处于平衡的杆所受的各外力是共点力，由于各力对各力作用线交点的力臂为零，则杆的平衡条件只由  $F = 0$  式决定。当杆有一个固定转动轴时，杆就不能平动。这时杆的平衡条件就只由  $M = 0$  式来决定。

对杆件的受力分析，在中学阶段通常只研究“二力杆件”和“三力杆件”两种情况。

若一个杆件只受两个外力的作用而处于平衡，我们把这样的杆件称为“二力杆件”如图(1)所示。由物体的平衡条件可以知道力  $F_1$  和  $F_2$  大小相等、方向相反，并且两个力的作用线一定和杆件的轴线重合，又如图(2)所示，可忽略重力的轻杆 AB 处于平衡态，由于只在 A 和 B 两端受到力的作用，所以属于“二力杆件”，即在 B 端两个绳的弹力之合力一定沿杆向左，而墙对 A 端的压力一定沿杆向右，这两个力是一对平衡力。

如果杆件只受相互不平行的三个外力作用处于平衡，我们称之为“三

力杆件”平衡。根据三力平衡原理，这三个力一定汇交于一点，如图(3)，均匀重杆 AB 属于“三力杆件”，杆的重力 G 作用线和拉力 T 的作用线交点为 O，可以判断出墙对杆的 A 端的压力 F 的方向一定通过 O 点。

如果处于平衡的杆受到四个力的作用，而其中有两个力的作用线互相平行，这样的杆件也可以转化为“三力杆件”，如图(4)所示，这三个力分别为绳的水平拉力 T；向下的力 P (P 为 B 点的弹力和杆的重力 G 的合力)；和墙对 A 点的压力 F。这三个力的作用线交点为 O。

三力平衡在静力学中是很普遍的，因此对“三力杆件”特点的认识和对其受力分析的研究是十分重要的。

**如何分析物体受力** 对物体进行正确地受力分析，是解决好力学问题的关键，如何进行物体的受力分析？大体可分为下面几个步骤。

(1)灵活地选择研究对象，也就是说根据解题的目的，从物体系中隔离出所要研究的某一个物体，或从物体中隔离出某一部分作为单独的研究对象。

所选择的研究对象要与周围环境联系密切并且已知量尽量多；对于较复杂问题，由于物体系各部相互制约，有时要同时隔离几个研究对象才能解决问题。究竟怎样选择研究对象要依题意灵活处理。

(2)第二是对研究对象周围环境进行分析，除了重力外查看哪些物体与研究对象直接接触，对它有力的作用，凡是直接接触的环境都不能漏掉分析，而不直接接触的环境千万不要考虑进来。然后按照重力、弹力、摩擦力的顺序进行力的分析，根据各种力的产生条件和所满足的物理规律，确定它们的存在或大小、方向、作用点。

(3)审查研究对象的运动状态，是平衡状态还是加速状态等等，根据它所处的状态有时可以确定某些力是否存在或对某些力的方向作出判断。

(4)根据上述分析，画出研究对象的受力图，把各力的方向、作用点(线)准确地表示出来。

如图(1)人和木板的质量分别为 m 和 M，不计滑轮质量及滑轮与绳之间的摩擦，保持系统静止时，求人绳子的拉力  $T_2 = ?$  (图(2)所示)

把人和木板看成一个整体，这样可以不必考虑人与木板之间的相互作用力，使问题简便些，如图(2)所示， $T_2$  是滑轮 B 上绳子对系统的拉力， $T_1$  是滑轮 A 上绳子对系统的拉力， $(M+m)g$  是地球对系统的重力。根据平衡条件有：

$$T_1 + 2T_2 = (M+m)g$$

再以滑轮 B 为研究对象，周围环境里三条绳子对它有力的作用，如图(3)所示，其中  $T_1'$  与  $T_1$  大小相等，根据平衡条件：

$$T_1' = 2T_2$$

$$\text{所以 } T_2 = \frac{1}{4}(M+m)g$$

对物体进行受力分析时，还要注意以下几点：

(1)正确地确定研究对象的模型。

质点和刚体是力学中两个理想化模型，对物体进行受力分析时，把它视为质点还是视为刚体，必须根据题意来确定。

当物体处于平动或平动平衡时，可以把它当做质点处理，这时各力的作用点可集中画到质心上。如图(4)所示，小球与 A、B 物之间无摩擦，并处于静止状态，则小球受到的力为：重力 G、A 点和 B 点对它的弹力  $N_A$  和  $N_B$ ，由于弹力方向垂直于接触点的切面，所以这三个力汇交于小球的质心 O 处。

当物体受力作用有转动效果时，不能把力的作用线横向平行移动，物体在哪一处受力，就必须把力的作用点画在那里，不能随便把各个力集中而通过质心，即不能把刚体当做质点处理，如图(5)所示，均匀梯子靠在光滑墙上，与水平成  $\theta$  角，而处于静止，梯子受力应如图(5)所示。而不能画成图(6)所示。

(2)恰当地选择研究对象是十分必要的。

对于几个质量都为  $m$  的物体组成的物体系如果要求物体系的外力，则当物体系各个物体的加速度相同时，应该用整体法分析物体受力。当物体系中各物体加速度不相同，一般用隔离法分析。如图(7)所示，五个质量相同的木块，并排放在倾角为  $\theta$  的斜面上，它们与斜面的摩擦系数相同，用力  $F$  沿斜面向上推物块时，斜面仍静止。若物块向上匀速运动，求地面对斜面的摩擦力？由于所求之力是系统的外力，又因为系统各个物体的加速度相同（为零），所以应该用整体法分析受力情况，如图(8)所示， $F$  在水平方向分力为  $F\cos\theta$ ，由于物体系处于静止状态，根据平衡条件，可知地面对斜面的摩擦力的大小为  $F\cos\theta$ 。若物体向上加速运动，试求物块 2 对物块 3 的推力大小？此时要用隔离法，由于只求第 2 块对第 3 块的推力，只需把 3、4、5 块作为一个整体隔离即可，其受力如图(9)所示。由方程：

$$\begin{aligned} T - 3\mu mg\cos\theta - 3mgsin\theta &= 3ma \\ F - 5\mu mg\cos\theta - 5mgsin\theta &= 5ma \end{aligned}$$

可解出  $T = \frac{3}{5}F$

从解题过程可以体会到分析内力时应恰当选择研究对象，如果把每个物块都分别隔离求解，就非常复杂。

(3)分析摩擦力的方法。

可以根据物体的平衡条件分析摩擦力。如均匀木棒处于静止状态。在(10)图中，B 端只受地面的支持力  $N_B$ ，从力的平衡角度分析可知，由于水平方向合力为零，所以 B 端不受地面的摩擦力。而在图(11)中 B 端就一定受到一个向右的摩擦力，否则水平方向合力就不能为零。

还可以根据牛顿第二定律分析摩擦力，如图(12)所示，放在小车 A 上的铁块 B，随小车由静止开始运动的时候，要确定铁块 B 受到的摩擦力方向，可考虑 B 随小车由静止开始运动时是加速过程，加速度方向向右，根据牛顿第二定律，B 受到的摩擦力方向也一定向右，正是靠摩擦力的作用，B 才有向右的加速度（图 12(a)）。同样可以分析出，若 B 随小车作匀速运动，则不受摩擦力作用（图(b)）。若 B 随小车减速向右运动，B 的摩擦力方向与加速度方向一致是向左的（图(c)）。此题也可以根据相对运动确定摩擦力方向，但从加速度角度考虑比较方便。

物体受力分析是一个灵活问题，方法也很多，读者应注意在学习过程中在理解物理概念和规律基础上多进行总结。

**力的合成** 求几个已知力的合力。

力的合成遵循平行四边形法则，不能认为“合力总比分力大”，两个共点力的合力大小为 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos\theta}$ 。可见，合力 $F$ 与二分力 $F_1$ 和 $F_2$ 的夹角有关，即 $F_1 + F_2 \geq F \geq |F_1 - F_2|$ 。在矢量合成中，一定要注意抛弃“ $1+1=2$ ”的算术运算法则。

在力的合成时，如果已知两个分力的大小、方向四个因素，求合力的大小、方向两个因素，只有一组解；如果已知一个分力的大小、方向和另一分力的方向（或大小）三个因素，求合力，则可有无数多解；如果只已知两个分力的大小（或方向）两个因素，求合力，也是无数多解。

合力是一种“等效力”。在物理学中，运用“等效”概念研究问题是一种重要方法。但在解力学问题时，要注意利用力的等效合成概念，使问题便于解决。但在分析物体受力情况时，我们只能分析物体实际所受的力，不能加上“合力”这样的等效力。例如，当物体沿光滑斜面下滑时，我们只能说，物体受到重力和斜面弹力的作用，而不能说还受到一个下滑力，因为下滑力是重力和弹力的合力，是“等效”力。

**平行四边形法则** 求两个互成角度的共点力的合力，可以用表示这两个力的有向线段为邻边，作平行四边形，这两个邻边之间的对角线就表示合力的大小和方向，合力的作用点就是分力的作用点。这叫做力的平行四边形法则。

平行四边形法是通过实验（例如用两个互成角度的共点力作用于橡皮条产生的形变效果，跟用一个力作用产生的形变效果相同），用几何作图法验证得到的，所以它是一条实验规律，是用几何法求矢量合成的普遍法则，对别的矢量（如位移、速度、加速度、动量等）的合成也同样适用。

**三角形法则** 三角形法则是平行四边形法则的简化。根据平行四边形对边平行且相等，先画好任意一个力，再以此力的末端作为第二个力的始端，画第二个力，连结第一个力的始端和第二个力的末端的有向线段，就是它们的合力。这种方法就叫做矢量合成的三角形法则。力的分解如果一个力作用于物体上，可以按其实际作用的效果，用两个或两个以上的力去代替，这几个力就叫做原来那个力的分力，这种等效代替的方法叫做力的分解。

力的分解是力的合成的逆运算，遵循平行四边形法则，是已知对角线求两个邻边的问题。显然，如果没有附加条件，则可有无数个答案。所以，力的分解关键在于根据具体情况确定某一已知力的实际作用效果。以下两种情况可以得到确定的分力。第一，根据力的实际效果能够确定两个分力的方向，则可得到两个分力的大小，第二根据力的实际效果能够确定一个分力的方向和大小，则可得到另一个分力的方向和大小。

如在图(1)所示的支架上悬挂一个重力为 $G$ 的灯。支架的重力不计。已知 $AO$ ， $BO$ ， $AB$ 的长分别为 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ，求支架两杆所受的力。

解：在支架的 $O$ 端悬挂电灯后，使支架的两根杆受到力的作用。由

于支架的 A、B 两端与墙壁是铰链连结，因此作用在杆上的力是沿杆的方向。但杆受的是拉力还是压力，需要通过实践来判断。可以设想，若将杆 AO 换成弹簧，则弹簧会被拉长，表示此杆受的是拉力。若将杆 BO 换成弹簧，则弹簧会被压缩，说明此杆受的是压力。这就是灯对支架 O 端拉力的两个分力所产生的实际效果。判断出两个分力的方向，那么根据平行四

边形法则很容易得出杆 AO 受到沿杆向外的拉力  $F_1 = \frac{L_1}{L_3} T = \frac{L_1}{L_3} G$ ，杆 BO

受到沿杆向内的压力  $F_2 = \frac{L_2}{L_3} T = \frac{L_2}{L_3} G$ 。

在力的分解中，若已知合力的大小、方向和另一分力的方向，如图 (2) 所示，则其解要进行讨论。

当  $F_2 < F \sin \theta$  时，无解；

当  $F_2 = F \sin \theta$  时，有一个解；

当  $F > F_2 > F \sin \theta$  时，有两组解；

当  $F_2 = F$  时，有一组解。

如图 (3) 所示，一个大人沿与河岸成  $\theta$  角的方向拉纤，要使平行河岸的船行方向上得到一个合力力  $F$ ，则另一岸的一个小孩如何用力最小。

这道题已知合力  $F$  的大小方向和另一分力  $F_1$  的方向，要求另一分力  $F_2$  最小，由作图法可知有唯一解： $F_2$  垂直  $F_1$  时， $F_2$  最小。

**力的正交分解** 将一个力沿着互相垂直的方向 (x 轴、y 轴) 进行分解的方法，如图所示

$$F_x = F \cos \theta$$

$$F_y = F \sin \theta$$

从力的矢量性来看， $F_x$ 、 $F_y$  是力  $F$  的分矢量；从力的计算来看， $F_x$ 、 $F_y$  的方向可以用正负号来表示，分量为正值表示分矢量的方向跟规定的正方向相同，分量为负值表示分矢量的方向跟规定的正方向相反。这样，就可以把力的矢量运算转变成代数运算。所以，力的正交分解法是处理力的合成分解问题的最重要的方法，是一种解析法。特别是多力作用于同一物体时，计算起来，非常方便。

利用正交分解法求合力可分以下四步：

1. 以力的作用点为原点，建立合适的直角坐标系；
2. 将各力进行正交分解；
3. 分别求出两个坐标轴上各分量的代数和 ( $F_x$ 、 $F_y$ )；
4. 正交合成，求出合力的大小和方向。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\text{tg} \phi = \frac{F_y}{F_x}$$

**牛顿第一定律** 一切物体 (质点) 总是保持匀速直线运动状态或静止状态，直到有外力作用迫使它改变这种状态为止。

牛顿第一定律包含着如下一些重要内容。

(1)无论是匀速直线运动状态还是静止态，都是速度矢量不变（速度大小和方向都不变）的状态。速度矢量不变的运动也就是没有加速度的运动，因此，如果物体不受到其它物体的力的作用，将保持没有加速度的运动。物体这种保持速度（矢量）不变的性质，称为惯性。第一定律指出，任何物体都具有惯性，故常称为惯性定律。有的同学认为，“只有运动的物体才具有惯性，”或“只有静止的物体才具有惯性，”这些看法都是不正确的。惯性是物体的固有属性，它和物体的运动状态无关，当物体不受外力作用时，一切物体都毫无差别地表现出惯性，所以，牛顿第一定律只是指出了惯性的存在，当物体受到外力作用时，物体的运动状态发生改变，但是外力作用不能改变物体的惯性，外力作用下，物体运动状态改变的快慢程度却与惯性有着直接的关系。这是牛顿第二定律将要研究的内容。

(2)如果物体的运动状态改变了，也就是有了加速度，那么，物体必定受到其它物体施予这一物体的力的作用。因此，第一定律可以说是对力下了定义，认为力是产生加速度的原因，而不是所谓“维持速度的原因。”例如，一物体某时刻的速度为 $v$ ，如果从这一时刻开始物体不受任何力的作用，根据牛顿第一定律可知，该物体从这个时刻开始，就以这个时刻的速度 $v$ 作匀速直线运动。可见维持速度不需要力的作用。

(3)一个物体的位置和它的运动情况，只能相对于被选作标准的另一个物体来确定，这个被选作标准的物体叫做参照物，或叫参考系统。那么，第一定律所指出，任何物体都保持静止状态或匀速直线运动状态的这种惯性又是相对于什么参照物而言的呢？实践告诉我们，牛顿第一定律并不是对任何参照物都成立的，我们把牛顿第一定律成立的参照物称为惯性参照物，牛顿第一定律不成立的参照物叫做非惯性参照物。这一点与运动学不同，在运动学里，为描述质点的运动，原则上我们可以选用任何物体为参照物。例如，行驶在公路上的汽车，当它急刹车时，在车中的乘客向前倾倒。若用地面为参照物来解释此现象就很自然：随车运动的乘客具有惯性，保持自己的速度不变，而汽车却是减速，这样乘客相对汽车就发生了向前倾倒的现象，这是符合牛顿第一定律的。但是，若以汽车为参照物，乘客未受到其它物体的力的作用而不能维持静止（相对汽车）状态，这就证明物体不具有牛顿第一定律所说的那种惯性，也就是无法用牛顿第一定律来解释这种现象。所以，对于急刹车的汽车（对地面有加速度）这个参照物，牛顿第一定律是不成立的。因此，我们说地面是一个惯性参照物，而对地面有加速度的汽车为非惯性参照物。至于什么样的物体为惯性参照物？什么样的物体为非惯性参照物？这只能根据观察和实验来判断。

我们知道地球绕太阳有公转，同时本身还自转，所以地球相对于太阳是有加速度的，因此严格说来地球不能视为惯性参照物，而太阳可作为一个较精确的惯性参照物。不过地球的加速度很小，在一般的精确范围内，仍不失为一个相当好的惯性参照物，除了专门研究地球自转所引起的力学现象外，研究地面上物体的运动，一般都取地面作为惯性参照物，实践证明静止于地面或相对地面作匀速直线运动的任何物体也可看做是惯性参照物，而相对地面作加速运动的任何物体都不是惯性参照物而是非惯性参照物。在应用牛顿定律解决力学问题时，必须选用惯性参

照物，这是需要特别注意的。

**牛顿第二定律** 物体在外力作用下，将获得加速度。加速度  $a$  的大小跟物体受到的外力  $F$  成正比，跟物体的质量  $m$  成反比，加速度的方向跟外力方向相同，这就是牛顿第二定律，其数学表达式为

$$F=ma$$

牛顿第二定律公式中的常数  $k$  是受单位制所制约的。在国际单位制中（米·千克·秒）， $k$  为 1。在应用牛顿第二定律解决各种动力学问题时，必须注意如下几个问题。

(1) 牛顿第二定律是一个瞬时关系，从第二定律公式  $F=ma$  可知，物体在外力( $F$ )的作用下，物体在瞬时产生加速度  $a$ ，也就是说被研究对象什么时刻受力，在该时刻就获得加速度；什么时刻力消失，在该时刻加速度就等于零。对于一定的物体来说，加速度的变化是随着力的变化而同时变化的。可见加速度和力之间存在着直接的、即时的因果关系。有些同学常常错误地认为力是产生运动的原因，认为力和速度之间有一种因果关系，其实牛顿第一定律已经告诉我们，在没有力的作用下，由于物体的惯性，物体同样是可以运动的。其次，速度是加速度对时间积累的结果，如果时间间隔  $t=0$ ，不管有多大的加速度，物体也不可能获得速度。所以速度和力之间不存在瞬时的因果关系。平常我们说一个物体在力的作用下由静止开始运动，这里有一个极短时间的加速度运动过程，并不是力产生了速度。

(2) 质量是物体惯性大小的量度，从牛顿第二定律可知，加速度和质量之间无因果关系，但是质量既对加速度的大小有影响（即  $a \propto \frac{1}{m}$ ），又对加速度与力之间的因果关系有影响，试设想物体质量无限大的时候，即使有外力作用物体也不可能获得加速度；如果物体质量为零时，加速度无限大而力却是个有限的数值。此时，物体的加速度与力之间不存在成正比的因果关系了。当然，质量既不可能无限大，也不可能是零值，利用这种外推法使我们更加认识了质量对加速度的深刻影响。

(3) 牛顿第二定律是一个矢量关系，牛顿第二定律公式， $F=ma$ ， $a$  和  $F$  都是矢量，而且加速度  $a$  的方向和力  $F$  的方向一致，对于只有一个力作用在物体上的情况，物体的加速度和力之间的矢量关系比较容易理解。即加速度大小与力的大小成正比，加速度  $a$  和力  $F$  的方向一致。如果物体上同时作用着几个力，这几个力各自产生着自己的加速度与它们各自单独作用在物体上时产生的加速度是相同的。根据这个结论，我们可利用矢量求和的平行四边形法则，分别求出这几个力的合力和合加速度。很容易证明物体的加速度（合加速度）与合力大小成正比，加速度方向与合力方向相同。因此，牛顿第二定律公式可以写成

$$F=ma$$

既然力和加速度都是矢量，可以根据平行四边形法则进行合成，当然也可以进行矢量分解处理。例如，一个物体在一个平面上运动，建立  $x$ - $y$  直角坐标系后，可以得到牛顿第二定律的分量式为

$$F_x=ma_x$$

$$F_y=ma_y$$

如果以法线( $n$ )和切线( $t$ )为正交坐标，则物体在平面上作曲线运动

时，牛顿第二定律的分量式为

$$F_t = ma_t$$
$$F_n = ma_n = m \frac{v^2}{R}$$

牛顿第二定律和牛顿第一定律一样，只有对惯性参照物才是成立的。

**牛顿第三定律** 两个物体之间的作用力和反作用力总是大小相等，方向相反，作用在一条直线上。其矢量表达式为： $F = -F$ 。

牛顿第三定律揭示了力的实质和来源——即力是物体与物体之间的相互作用。事实上，任何一种力都是由相互作用的双方共同决定的。例如：万有引力决定于物体双方的质量和相互之间的距离（ $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ ）

，库仑力决定于点电荷双方的电量和相互之间的距离（ $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ ），

摩擦力则决定于两接触物体双方的表面性质和状态，以及双方的相对运动情况，等等。不研究相互作用的双方，就无法得到每一种力的作用规律。由此可见，牛顿第三定律是把相互作用的双方整体作为研究对象，从而确定它们的相互关系的。第三定律是牛顿总结两个小球碰撞这类相互接触物体之间的作用力和反作用力的基础上首先提出来的，是他的独特贡献。

学习牛顿第三定律，应注意以下几点。

1. 作用力和反作用力分别作用在相互作用的两个物体上，其效果不能抵消。我们知道甲物体对乙物体有作用力，乙物体必对甲物体有反作用力。把力分成作用力和反作用力，并不是绝对的，我们可以把相互作用中的任一个力叫做作用力，另一个就叫做反作用力。并不是先有作用力，然后才有反作用力。作用力和反作用力总等值、反向、共线、同时出现、同时消失、分别作用在相互作用的两个物体上，各产生各的效果，不会互相抵消。“鸡蛋碰石头，鸡蛋破了，石头完好”，不能说石头对鸡蛋的力大于鸡蛋对石头的力，只能说明大小相等的作用力和反作用力分别作用在两个不同的物体，由于它们的材料结构不同，产生了各自不同的效果。而一对平衡力，虽然也是等值、反向、共线，但却是作用在同一个物体上，所以效果能够抵消，使物体处于平衡状态。而且其中一个力消失，另一个力不会随之消失。例如：悬挂在细线上的小球由于受到重力  $G$  和拉力  $F$  这一对平衡力的作用而静止，当剪断细线，拉力  $F$  消失，而小球仍受重力  $G$  的作用，作自由落体运动。

2. 作用力和反作用力是同性质的力。如前所述，牛顿第三定律是以相互作用的双方作为研究对象的，只涉及两个物体。因此，产生作用力和反作用力的条件相同，它们必然是成对出现的同性质的力。如前例，细线对小球的拉力  $F$  和小球对细线的拉力  $F$  都是由于二物微小形变产生的一对弹力。地球对小球的引力  $G$  和小球对地球的引力  $G$ ，同属万有引力。而一对平衡力，涉及三个物体，两个施力物所施的力共同作用在一个物体上，所以力的性质不一定相同。

3. 在低速运动范围，不论是静止物体间的相互作用，还是运动物体

间的相互作用；不论是匀速运动物体间的相互作用，还是加速运动物体间的相互作用；不论是持续的相互作用，还是短暂的相互作用；都遵循牛顿第三定律，即牛顿第三定律对任何参照系都成立。同时，由牛顿第三定律可知，当两物体不受外力作用而只有相互作用时，它们的总动量的变化为零。这个结论对于由任意多个物体组成的封闭系统也成立，这就是动量守恒定律，它是物理学的基本定律之一。这个定律不仅适用于宏观物体之间的相互作用，也适用于微观的质点（即原子、原子核和电子）之间的相互作用。

**单位制** 由基本单位和导出单位所组成的一个单位系统。

目前，绝大多数国家和我国都在积极推广国际单位制。国际单位制是一九六一年第十一届国际计量大会通过的，其代号为 SI。

国际单位制的基本单位有 7 个：

1. 长度单位——米；
2. 质量单位——千克；
3. 时间单位——秒；
4. 电流单位——安培；
5. 热力学温度单位——开尔文；
6. 物质的量单位——摩尔；
7. 光强度单位——坎德拉。

由上述七个基本单位和以此推出的导出单位就组成了一个完整的单位系统——国际单位制。在物理学中，特别是在理论物理学中，有时需要使用厘米克秒制单位及其发展的电磁单位，所以厘米克秒单位制至今仍作为一种保留使用的单位制。国际计量委员会认为，在使用厘米克秒制时，一般最好不与国际单位制并用。

**单位制在物理计算中的作用** 掌握单位制的知识对于物理计算十分重要。

在国际单位制中，我们选用长度、质量和时间的单位作为力学的基本单位，为了明确地反映各物理量单位之间的关系，我们可以用 L 来代表长度，用 M 与 T 代表质量和时间。这样，凡是包含长度、质量和时间的一切物理量，都可以用 L、M、T 的适当的次幂表示出来。即一个物理量 Q 与基本量的关系可以表示为

$$[Q] = L^p M^q T^r$$

关系式中的各个指数 p、q、r 称为物理量 Q 在国际单位制中的量纲。如以力 F 为例：

$$[F] = [M] [a] = LMT^{-2}$$

我们可以说，物理量力 F 对长度、质量和时间的量纲分别为 1、1 和 -2。上式的  $LMT^{-2}$  称为物理量力的量纲式。可见“量纲”和“量纲式”是两个不同的概念。

我们从单位制中引出“量纲”的概念，可以在物理计算中帮助我们检验所推出的公式是否正确，因为只有量纲相同的量才能互相加减和用等号相联结。例如，某人在描述物体运动时，推得公式

$$U^2 = U_0 t + \frac{1}{2} at$$

这个公式是否正确？我们可以利用量纲进行初步判断。公式中涉及

三项，各项的量纲式分别为  $L^2T^{-2}$ 、 $L$  和  $LT^{-1}$ 。三项的量纲各不相同，但却互相加减和用等号联结，所以肯定公式是错误的。

**运用牛顿运动定律解题思路** 牛顿运动定律是经典力学的基础定律。它以牛顿第二定律为核心，解决了运动和力的关系问题。运用牛顿运动定律解题，重点是研究运用牛顿第二定律解题的思路。

由牛顿第二定律公式  $F=ma$  可知，式中  $m$  表示研究对象的质量；等式左边  $F$  表示物体所受到的外力的合力。等式右边  $a$  表示物体在  $F$  作用下的瞬时效果， $F$  是“因”， $a$  是“果”；等号表示等式左右两边不仅数值大小相等，而且  $F$  与  $a$  方向一致， $F=ma$  是矢量等式。运用牛顿第二定律解题的基本思路是：

1. 仔细审题，明确研究对象；

2. 隔离研究对象，进行受力分析，画好受力图；进行运动分析，画好运动草图；

3. 建立适当的坐标系，进行力的正交分解，根据牛顿第二定律建立动力学方程（ $F_x=ma_x$ ， $F_y=ma_y$ ），根据运动学公式建立运动学方程；

4. 求解方程组，对结果作必要的讨论和说明。

如图所示。木块 A、B 叠放于水平面上，它们的质量分别为  $m_A=4.0$  千克， $m_B=6.0$  千克。A、B 间的滑动摩擦系数  $\mu_1=0.25$ 。其相互作用的静摩擦力的最大值为  $f_{\max}=12$  牛，B 与水平面间的滑动摩擦系数  $\mu_2=0.20$ 。现用水平恒力  $F$  向右拉 B，在下述两种情况下，两木块的加速度及二者间的摩擦力各是多少？(1) $F=40$  牛；(2) $F=54$  牛。（计算中取  $g=10$  米/秒<sup>2</sup>）

解：先求出 A、B 能保持相对静止的最大加速度  $a_0$ ，由  $f_{\max}=ma_0$  可知：

$$a_0 = \frac{f_{\max}}{m_A} = 3 \text{ 米/秒}^2$$

设此情况下作用于 B 的水平拉力为  $F_0$ ，以整体为研究对象，根据牛顿第二定律有：

$$F_0 - \mu_2(m_A+m_B)g = (m_A+m_B)a_0$$

$$\text{所以 } F_0 = \mu_2(m_A+m_B)g + (m_A+m_B)a_0$$

$$= 50 \text{ 牛}$$

当  $F < F_0$  时，A、B 相对静止；

当  $F > F_0$  时，A、B 间有相对滑动。

(1) $F=40$  牛  $< F_0$ ，A、B 相对静止，加速度  $a_A=a_B=a_1$ ，由 式可得：

$$a_1 = \frac{F_1 - \mu_2(m_A + m_B)g}{m_A + m_B} = 2.0 \text{ 米/秒}^2$$

$$f_{BA} = m_A a_1 = 8.0 \text{ 牛}$$

(2) $F=54$  牛  $> F_0$ ，A、B 相对滑动。此时 A 受到 B 给它的水平向右的滑动摩擦力  $f$  的作用，依滑动摩擦力公式有  $f = \mu_1 m_A g = 10$  牛；根

据牛顿第二定律可知： $f = m_A a_A$ ，因此， $a = \frac{f}{m_A} = 2.5 \text{ 米/秒}^2$ 。

根据牛顿第三定律可知，A 对 B 的滑动摩擦力水平向左，大小也是 10 牛。以 B 为研究对象，根据牛顿第二定律：

$$F_2 - f - \mu_2 (m_A + m_B) g = m_B a_B$$

$$a_B = \frac{F_2 - f - \mu_2 (m_A + m_B) g}{m_B}$$

$$= 4.0 \text{米} / \text{秒}^2。$$

**超重、失重、完全失重** 当物体存在向上的加速度时它对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）大于物体所受到的重力的现象，叫做超重；当物体存在向下的加速度时，它对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）小于物体所受到的重力的现象，叫做失重；当物体向下的加速度等于重力加速度时，它对支持物的压力（或对悬挂物的拉力）等于零的现象，叫做完全失重。

弄清超重和失重现象，应注意区别“重力”和“视重”这两个不同的概念。对同一物体而言，重力是由于地球对这个物体的吸引而产生的力，它作用在这个物体上；而“视重”是这个物体对支持物（或悬挂物）的作用力，它作用在支持物（或悬挂物）上。所以，重力是物体所受的力，视重是物体对支持物（或悬挂物）所施的力。如图所示，货物放在支持板上，地球对货物的吸引而产生的力  $G$  称为重力，货物对支持板所施的压力  $N'$  称为视重。在一般情况下（如货物静止在支持板上，或随支持板一起作匀速直线运动），重力的大小和视重是相等的。但是，如果让支持板和货物一起作自由落体运动，货物将处在“完全失重”状态。显然，“失重”中的“重”，指的不是“重力”而是“视重”。

“超重”和“失重”的现象在宇宙航行中是不难遇到的。人坐在火箭中，当火箭发射而加速上升时，人有体重增大的感觉，这就是超重现象；当火箭降落时，人有漂浮的感觉，这就是失重现象。乘过电梯的人，也有类似的体验。

**平衡** 若物体保持静止状态或保持匀速直线运动状态或绕固定转动轴做匀速转动，这时我们说物体处于平衡状态，简称平衡。在力学中，平衡有两种情况，一种是在共点力作用下物体的平衡（即平动平衡）；另一种是在几个力矩作用下物体的平衡（即转动平衡）。

平衡状态和平衡条件是不相同的。平衡状态指物体的运动状态；而平衡条件是指要使物体保持平衡状态时，作用在物体上的力和力矩要满足的条件。如物体在共点力作用下的平衡条件是所有外力的合力为零，即  $F=0$ ；使物体转动平衡的平衡条件是作用在物体上所有力矩之和为零，即  $M=0$ 。

平衡状态和平衡位置是不同的，处于平衡状态的物体，可以有无数位置坐标，但这些位置坐标不叫平衡位置，平衡位置是指做往复运动的物体，当该物体静止不动时的位置或物体回复力为零的位置。如单摆摆球在  $AB$  之间振动，摆球静止时的位置  $O$  点叫做单摆的平衡位置，此时摆球的回复力为零。当摆球运动时，它是以前平衡位置为中心往复运动。在研究振动物体时，都是以平衡位置为坐标原点的。

**共点力的平衡** 在共点力作用下物体处于静止或匀速直线运动的状态。物体同时受几个共面力的作用，如果这几个力都作用在物体的同一点，或这几个力的作用线都相交于同一点，这几个力就叫做共点力。在共点力作用下物体的平衡条件是物体所受的合外力为零，即  $F=0$ ，如果把这些力分解到直角坐标系  $xoy$  中，则可得平衡条件的分量式为

$F_x=0$ ,  $F_y=0$ 。在相互平衡的几个共点力中, 其中任何一个力一定与其它几个力的合力大小相等, 方向相反, 即共点力的平衡可归结为二力平衡。

用共点力平衡条件解题时, 关键是要正确分析受力, 画出力图, 然后再确定具体解法, 在认真分析的基础上, 采取最简方法。

**三力平衡原理** 物体在三个力的作用下, 处于平衡状态, 叫做三力平衡。三力平衡有一条重要而简单的法则: 如果它们不平行, 它们的作用线必交于一点(只讨论共面力系), 在图(1)中, 杆 AB 在  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  作用下静止, 若三个力不交于一点, 而是交于  $O_1$  和  $O_2$ , 则杆对以  $O_1$  或  $O_2$  任一点为轴的合力矩都不为零。所以,  $O_1$  和  $O_2$  必重合。因此, 对于这类问题, 既可用力矩平衡条件求解, 也可以用共点力平衡求解。如图(2)所示, 不均匀细杆 AB 长 1 米, 用两根细绳悬挂起来, 当 AB 在水平方向平衡时, 二绳与 AB 夹角分别为  $30^\circ$  和  $60^\circ$ , 求 AB 的重心位置?

因杆处于平衡, 受到的三个力  $T_1$ 、 $T_2$  和  $G$  必交于点  $O$ , 只要过  $O$  点作一条 AB 的垂线, 它与 AB 的交点  $C$  就是 AB 的杆的重心。由三角函数关系可知重心  $C$  到 A 的距离为 0.25 米。

物体在共点力作用下, 其合力的作用点就是各分力的作用点, 如果物体是在同向平行力作用下, 则合力的大小等于各分力之和, 方向跟分力方向相同。但合力的作用点则需通过计算才能求得。如图(3)所示, 三个平行力  $F_1=10$  牛,  $F_2=20$  牛,  $F_3=30$  牛, 它们的作用点距物体端点  $O$  的距离分别为 20cm、30cm、70cm, 则合力为:

$$F_{\text{合}}=F_1+F_2+F_3=60 \text{ 牛}$$

设合力作用点在  $P$ , 如选  $O$  点为转轴, 则合力  $F_{\text{合}}$  对  $O$  点的力矩必须等于各分力对  $O$  点的力矩之和, 即

$$F_{\text{合}}x = F_1 \cdot \overline{OA} + F_2 \cdot \overline{OB} + F_3 \cdot \overline{OC}$$

解后可得  $x=0.48$  米

即合力的作用点距  $O$  点为 48 厘米。

**力矩** 力( $F$ )和力臂( $L$ )的乘积( $M$ )。即:  $M=F \cdot L$ 。力矩是描述物体转动效果的物理量, 物体转动状态发生变化。才肯定受有力矩的作用。

当物体绕固定轴转动时, 力矩只有两种可能的方向, 所以可用正负号来表示。一般规定: 使物体沿逆时针方向转动的力矩为正; 使物体沿顺时针方向转动的力矩为负。因此作用于有固定轴的转动物体上的几个力矩的合力矩就等于它们的代数和。这个代数和将决定物体是处于平衡状态, 还是非平衡状态。

在国际单位制中, 力矩的单位是牛顿·米, 注意不能写成焦耳。焦耳是能量单位, 力矩和能量是两个不同的概念。

在计算力矩问题时, 要注意力臂是在垂直转动轴的平面内, 从转动轴到力的作用线的垂直距离。

**力偶、力偶矩** 两个大小相等、方向相反的力, 并且力的作用线互相平行而不重合, 这样的一对力称为力偶。力偶中两力的垂直距离称力偶臂, 力偶所在的平面称力偶作用面。如用手指旋钥匙、水龙头时, 所施加的作用常是力偶。指南针的北极和南极受到地磁场的作用, 如图(1)所示, 两磁场力大小相等, 一个力指向南, 一个力指向北, 只要这两个

力不在同一条作用线上，就形成了一个力偶。

图(2)所示，表示由两个力组成的力偶，每个力的大小均为  $F$ ，相距为  $l$ ，从整体上看，其合力为零： $F_{\text{合}}=F-F=0$ 。因为合力为零，所以力偶不能改变物体平动状态，力偶的作用效果仅仅是使物体转动状态发生改变。力偶的转动效应决定于力偶的力矩，简称为偶矩。力偶矩是力偶对某一转动轴的合力矩，如图(2)中，绕任意点  $O$  的力偶合力矩为：

$M=Fx_2-Fx_1=(x_1+l)F-Fx_1=Fl$  由上式可知，由于  $O$  点是任意选取的，所以一个力偶矩的大小跟所选取的转轴无关，它仅由力偶中的任意一个力和力偶臂的乘积决定。

如果有几个力偶同时作用在物体上，则物体的转动效果将由力偶矩的代数和决定。力偶矩代数和为零时，物体将保持角速度不变或保持静止。

**有固定转动轴的物体平衡** 在几个力矩作用下，有固定转动轴的物体平衡状态是指该物体处于静止和匀速转动的状态。

有固定转动轴的物体的平衡条件是作用于物体的所有外力矩的代数和等于零，即  $M=0$ 。

运用有固定转动轴的物体的平衡条件分析问题如，果恰当地选择研究对象和正确地分析力，常常可使问题的解决大为简化。

**杆秤** 根据有固定转动轴物体的平衡条件为原理制成的称量物体质量的工具。如图(1)所示。 $O$  处是提纽，为杆秤的固定转动轴； $B$  处固定秤钩，用以吊挂被测重物； $C$  点为杆秤的重心；当秤钩上没有挂被测物体时，移动秤锤于  $A$  处，提起提纽，使秤杆平衡，则秤锤的位置  $A$  点就是杆秤的零刻度，也叫做定盘星。

把质量为  $50$  克( $1$  市两)的物体挂在秤钩上，调整秤锤的位置，使杆秤平衡，这时秤锤的位置就是秤的  $50$  克的刻度。再把秤钩上挂的质量换为  $100$  克、 $200$  克等物体，使杆秤平衡就能找出  $100$  克、 $200$  克等刻度的位置等等。一旦杆秤上刻度确定后，提纽、挂钩的位置和秤锤的质量就不能再改变，否则原刻度线就得重新修定。

实用中的杆秤，定盘星也可以在提纽的右侧，但此杆秤的重心在左侧，总之定盘星和杆秤的重心，一定在提纽的两侧。

杆秤问题的计算，实质上是有固定转动轴物体平衡条件的应用。例如，我们证明杆秤的刻度是均匀的，即称重物时，秤锤的位置到定盘星  $A$  点的距离和被称重物的质量成正比时，可列出两个方程，其一为不挂重物时的力矩平衡方程，另一个是挂上重物后的力矩平衡方程，就可求解。即不称重物时(图(1)所示)：

$$m_1 g \overline{OC} = m_2 g \overline{OA}$$

其中  $m_1$  为杆的质量， $m_2$  为秤锤的质量。

秤钩上挂上重物  $mg$  后：

$$mg \overline{OB} = m_1 g \overline{OC} + m_2 g \overline{OD}$$

由 式得：

$$mg \overline{OB} = m_2 g \overline{OA} + m_2 g \overline{OD} = m_2 g \cdot l$$

$$\text{所以 } l = \frac{\overline{OB}}{m^2} \cdot m$$

$$\text{即 } l \propto m$$

市场上所谓不准秤，是不法商人将杆秤的秤锤换成小质量的，由式可知，在同一刻线上（ $l$ -定）只需要较小的质量  $m$ ，就能使杆秤平衡，这样消费者利益就受到损害。或者加大秤钩（盘）的重量，或者将杆秤内部掏空，并在其中注入流动性好的水银，称重时，抬高秤尾，使水银流到有挂钩（盘）的一端，这样式就成为

$$(m_2 g + mg) \overline{OB} = m_2 gl$$

其中  $m_2$  表示水银或秤钩（盘）所增加的质量，可以看到，当  $m_2$ 、 $l$  一定时，所要称的质量  $m$  自然要减小。起重机的平衡有各式各样的起重机，图所示是一种塔式起重机，机身为一塔架，有一个可回转的长臂架，臂架装在高耸塔架的上部，主要用吊钩吊运重物。

设起重机自身重力为  $G_0$ ，重心在中心线  $OO'$  上，它的额定起重的重力为  $G$ ，吊货物的钢索与中心线相距为  $a$ ，平衡箱  $P$  的重心离中心线为  $b$ ，起重机底座的宽度为  $l$ ，那么起重机的平衡箱的重力应取多少？

当起重机空载时，平衡箱和塔身的公共重心在  $OA$  之间，若平衡箱重力过大，整体重力的作用线就可能超出支持面右侧  $A$  点，以致使起重机向右倾倒，因此，平衡箱的重力有个允许的最大值，为了保证空载时起重机不向右倾倒，平衡箱的重力  $G_1$  对  $A$  点的力矩不能大于起重机自身重力  $G_0$  对  $A$  点的力矩，所以

$$G_1 \overline{AP} = G_0 \overline{OA}$$

所以

$$G_1 = \frac{G_0 \overline{OA}}{\overline{AP}} = \frac{G_0 \cdot \frac{l}{2}}{b - \frac{l}{2}} = \frac{G_0 l}{2b - l}$$

当塔吊满载时，为了不使公共重心超出支承面的  $B$  点，平衡箱的重力  $G_1$  不能小于某个值，这个最小值计算如下：以  $B$  为转动轴，由力矩平衡条件  $M_B=0$  可以得到

$$G'(b + \frac{l}{2}) + G_0 \cdot \frac{l}{2} \cdot (a - \frac{l}{2})$$

$$\text{所以 } G' = \frac{2aG - Gl - G_0 l}{2b + l} = \frac{G(2a - l) - G_0 l}{2b + l}$$

以上计算结果表明，平衡箱的重心不能大于  $\frac{lG_0}{2b - l}$ ，也不能小于  $\frac{G(2a - l) - lG_0}{2b + l}$ 。

**平衡的种类** 一个物体，如果是在重力场（或电场或其他有势场）中满足  $F=0$  和  $M=0$  条件，则可处于平衡状态，而这种平衡状态又可以分为稳定平衡状态，不稳平衡状态和随遇平衡状态三种情况。

稳定平衡在重力场中的物体都有向势能较小的位置运动的趋势，相对势能越小，物体就越稳定，所谓稳定平衡是指物体处于势能最小位

置时的平衡。它的特点是：如果给它一个微小的扰动，使它离开平衡位置，外界必须对它做功，这样势能就增加，扰动后，物体又能自动回到原来势能最小的位置。

不稳定平衡在重力场中，物体处于势能最大的平衡，叫做不稳定平衡。它的特点是，如果任何微小扰动，使它离开平衡位置，外界不必对它做功，而自身的重力对它做正功，使其势能减小，因此，再也不可能自动回到原来那个势能最大的位置了。这种平衡状态是极不稳定的，很难以实现的。如走钢丝的杂技演员，就是在重力和支持力作用下平衡，是属于不稳平衡。杂技演员就是凭借他掌握不稳平衡的高超技巧，以惊险而优美的动作，牵动观众们的心。

随遇平衡是指处于平衡状态的物体，在受到微小扰动后，势能始终不变，即重心高度总保持不变；物体所受到的合外力和合力矩总为零。因此它可以在任意位置保持平衡。如小球在水平面上滚动到任何位置时，重力和支持力能平衡，所以小球在水平面上是处于随遇平衡状态。

**稳度** 是指物体稳定平衡状态的稳定程度，稳度的大小由物体重心的高度和支持面的大小决定。重心低，支持面大的物体稳度大，反之则稳度小。所谓支持面是指物体各部分所围成的面积。如站在行驶车厢里的人，为了增大稳度，往往把两腿叉开，这样两脚所围成的面积就增加了，支持面增加了（同时重心也降低了），稳度增大了。又如一块砖平放和竖放相比较，平放时重心低，支持面积大，所以稳度就大。如图所示，一物块，如果受到某外力矩的作用，使其重力作用线通过 B 点时（如图(b)和图(c)，物块将翻倒。只要重力作用线没有通过 B 点或重力作用线转过的角度小于  $\theta$ （如图(a)和图(c)），物体就会在自身重力作用下回到初始位置，稳定平衡就不会被破坏。当底面积越大， $\theta$  角越大（图(a)），重力矩越大（如以 B 点为轴），同样大小的外力矩，就越不易破坏它的稳定平衡状态。当物体重心升高，重力作用线转过较小的  $\theta$  角（图(c)）就将通过 B 点，即稳度降低，可以设想，当重心无限高时， $\theta$  角趋近于零，则物体的稳度为零。增大物体的稳度有重要的实际意义，为了增大物体的稳度，既可以增大底面积，也可以降低重心的高度，还可以同时增大底面积和降低重心高度。精密的天平一定安置在一个底面积较大，又较重的底座上；高压线的铁塔都有一个很大的支持面；越野汽车和山区的拖拉机轮间宽度都较大，都是为了增大物体的稳度。

**曲线运动** 质点运动的轨迹是曲线的运动。做曲线运动的质点其速度、加速度及受力情况均有别于直线运动。曲线运动中，即时速度的方向沿曲线的切线方向。对此，可结合图(1)来理解。图中的曲线表示质点运动的轨迹，若质点从 A 到 B 历时为  $t$ ，与  $t$  相对应的位移可用  $s$  表示，从 A 到 B 的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{s}{t}$$

平均速度的方向就是  $s$  的方向，显然它由曲线的弦的方位决定。若将  $t$  的取值减小为  $t'$ ，其对应的位移为  $s'$ ，则有

$$\bar{v} = \frac{s'}{t'}$$

若将  $t'$  继续减小，平均速度大小和方向也不断变化，可见平均速度

的大小和方向与时间间隔的选取有关。但是当  $\Delta t \rightarrow 0$  时，平均速度将趋于一个定值——极限值，该极限就是质点在 A 处的即时速度  $v_A$ ，它的方向沿 A 点的切线方向。

曲线运动中，速度矢量的方向不断改变，图(2)中  $v_A, v_B$ ，分别表示 A、B 两点的即时速度， $v_A$  为初速度， $v_B$  为末速度，其速度的变化量如图中的  $\Delta v$  所示。显然，如果  $v_A, v_B$  的大小相等， $\Delta v$  也不会等于零。所以曲线运动是变速运动。

曲线运动中的加速度仍然由  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$  来确定，加速度的方向就是速度变化的方向。图(2)中，质点从 A 到 B 的平均加速度的方向就是  $\Delta v$  的方向。当  $\Delta t \rightarrow 0$  时， $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  的极限就是 A 点的即时加速度。

一般来说，即时加速度的方向既不和曲线相切，也不和曲线的法线重合。如图(3)中  $a_A$  所示。若将  $a_B$  沿切线和法线方向分解，可得  $a_t, a_n$  两个分量。 $a_t$  称为切向加速度，它表征速度大小改变的快慢， $a_n$  称为法向加速度，它表征速度方向改变的快慢。法向加速度的存在是曲线运动有别于直线运动的显著特征。也可称之为曲线运动学特征。

力是产生加速度的原因，图(3)中  $a_A$  的方向也是质点所受合外力的方向。做曲线运动的质点所受合外力的方向与速度方向不在一条直线上，这既是曲线运动的动力学特征，也是质点做曲线运动的条件。典型的曲线运动有：平抛运动、斜抛运动、圆周运动等。

运动的独立性原理一个物体同时参与两个或更多的运动，这些运动都具有独立性，其中的任一个运动并不因为另一个运动的存在而有所改变。合运动就是这些互相独立的运动的叠加，这就是运动的独立性原理或运动的叠加原理。

此原理可从两方面来理解：其一，分运动各自独立，互不影响。例如：竖直上抛运动中的二个分运动即竖直向上的匀速直线运动和竖直向下的自由落体运动同时存在而又互相独立，如图，在公式

$$h = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2 \text{ 中，}$$

$$\text{设 } t = \frac{v_0}{g}, \text{ 则 } h_1 = v_0 t = \frac{v_0^2}{g},$$

$$h_2 = \frac{1}{2} g t^2 = -\frac{1}{2} \frac{v_0^2}{g}, \text{ 所以 } H = h_1 - h_2 = \frac{v_0^2}{2g}。$$

其二，物体在某一时间间隔的位移以及某时刻的速度、加速度均由分运动的对应量叠加而成。例如，渡船在河水中相对地的速度，就是由水流速度和船相对水的速度叠加产生的。这种叠加遵从矢量合成的法则。描述物体运动过程及状态的物理量位移、速度、加速度等都是运动时产生的效果。合运动的总效果等于分运动各自所产生的效果的叠加。

运动的合成 已知分运动求合运动。运动的合成包括位移、速度、加速度的合成，合成的方法是运用平行四边形法则从分矢量求得合矢

量。

运动合成中最简单又最重要的是互成角度的两个直线运动的合成。分运动虽然都是直线运动，但合运动的轨迹可能是直线，也可能是曲线。例如从高空竖直落下的雨滴在地面附近做竖直向下的匀速直线运动，当受风力作用使雨滴具有恒定水平分速度时，雨滴则做斜向下的直线运动。若风力时大时小，则雨滴下落的轨迹必是曲线。合运动的轨迹在什么条件下是直线，在什么条件下又是曲线呢？一般地说，互成角度的两个分运动都是匀速直线运动，其合运动一定是直线运动；若一个分运动是匀速直线运动，另一个分运动是变速直线运动，合运动是曲线运动。例如：船在匀速流动的河水中船头正对河岸匀速行驶，其轨迹是偏向下游的直线；若船加速行驶，则轨迹是曲线。两个分运动都是匀变速直线运动而且合加速度方向恰好与速度方向在一条直线上，则物体运动的轨迹是直线。图中，若物体从  $t=0$  时刻静止开始从坐标原点出发，在  $x$  方向做加速度为  $a_x$  的匀加速直线运动，在  $y$  方向做加速度为  $-a_y$  的匀加速直线运动，则物体运动的轨迹是直线，该直线与  $x$  正方向的夹角为  $\theta = \arctg \frac{a_y}{a_x}$ ，合加速度的大小为  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ 。如果该物体在  $t=0$  时刻具有水平初速度  $v_{0x}$ ，则物体运动的轨迹就不是直线，物体将做加速度  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$  的匀变速曲线运动。

运动的分解将某一个复杂的运动分解为二个或多个简单的运动。

运动分解的基本依据是运动的独立性原理。具体运用时要按照运动产生的实际效果和化繁为简的目标灵活处理。如抛出的铅球做曲线运动。我们可以把它分解为两个直线运动。设想如果没有地球吸引力作用，铅球脱手后将做斜向上的匀速直线运动，如图中  $OA$  射线所示。设想如果有地球吸引力而无初速度铅球将做自由落体运动。所以铅球所做的曲线运动可以分解为沿初速度方向的匀速直线运动及竖直向下的自由落体运动这两个直线运动。物体经  $t$  秒后的位移  $s_t$  是  $t$  秒内二个分运动产生的位移  $s_1$  和  $s_2$  的矢量和。物体在  $t$  秒末时的即时速度  $v_t$  是两个分运动的即时速度  $v_0$  和  $gt$  的矢量和。图中的二个矢量三角形分别表示分位移与合位移、分速度与合速度的关系。铅球的运动也可用正交分解的方法，将其分解为水平匀速直线运动与竖直上抛运动两个分运动（详见“斜抛运动”）。

由于两个分运动中只有自由落体运动具有加速度，所以合运动的加速度仍为重力加速度  $g$ ，可见，铅球的运动是匀变速曲线运动。

**平抛运动的特点** 将物体用一定的初速度沿水平方向抛出，物体所做的运动就是平抛运动。做平抛运动的物体仅受重力（不计空气阻力）作用。平抛运动可以分解为水平匀速直线运动和自由落体运动两个分运动。用平面直角坐标表示这两个分运动可得如下公式：

$$x = v_0 t$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

由此两式中消去  $t$ ，可得

$$y = \frac{1}{2} \frac{g}{v_0^2} x^2$$

此式说明平抛运动的轨迹是抛物线，如图(1)所示。平抛运动的位移是从坐标原点 O 到轨迹上某一点（如 A 点），所引的有向线段，若用  $x$ 、 $y$  表达  $s$ ，则  $s = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{v_0^2 t^2 + \frac{1}{4} g^2 t^4}$ 。所以，平抛运动的位移的大小和方向都是时间  $t$  的函数。

平抛运动的即时速度沿抛物线的切线方向，如图(2)所示。将即时速度分解为水平分量  $v_0$  和竖直分量  $gt$ 。图中  $v_1$ 、 $v_2$  分别表示  $t_1$ 、 $t_2$  时刻的即时速度。由于  $v_1$ 、 $v_2$  的水平分量都是  $v_0$ ，所以将  $v_1$ 、 $v_2$  的起点平移到同一点，这两个矢量的末端必然位于同一竖直线上。

平抛运动即时速度的大小为  $v_t = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$ ，即时速度与水平分速度  $v_0$  的夹角  $= \arctg \frac{gt}{v_0}$ 。

平抛运动的加速度恒为  $g$ ，所以平抛运动是匀变速曲线运动。

平抛运动的落地时间与初速度无关，仅由竖直高度决定，即  $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$

。平抛运动的水平位移由初速度及竖直高度决定，即  $x = v_0 t = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$ 。

**斜抛运动的特点** 斜抛运动和平抛运动都是物体仅在重力作用下的运动，但斜抛运动的初速度方向不是水平方向而是沿斜向上的方向，其轨迹是抛物线，如图(1)所示。

在“运动分解”条目中曾将斜抛运动分解为沿初速度方向的匀速直线运动和自由落体运动两个运动。

如果用正交分解的方法还可以将斜抛运动分解为水平方向的匀速直线运动和竖直向上的竖直上抛运动。其初速度分别为

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \theta$$

水平位移和竖直位移分别为

$$x = v_0 \cos \theta \cdot t \quad y = v_0 \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$

斜抛运动的这两种分解方法各有其优点。例如：用枪瞄准树干上的一只猴子，在子弹飞出枪口的瞬间，假设猴子恰好沿直立的树杆做自由落体运动，由第一种分解方法易于得出猴子终难逃脱被击中的厄运；但如果要求解斜抛运动中某时间的位置坐标，以及位移、速度、射高、射程等问题，运用第二种分析方法就比第一种简单一些。如图(2)中，物体以初速度  $v_0$  射角  $\theta$  做斜抛运动，并落在斜面上的 P 点，斜面与水平面夹角为  $\alpha$ ，则射程 OP 可用正交分解的方法来求解。

设  $v_0$  的水平分量和竖直分量分别为  $v_x$  和  $v_y$ ，则

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha$$

设物体达 P 点历时为 t，由水平和竖直两个分运动可得

$$x = s \cos \alpha = v_0 \cos \alpha \cdot t \quad (1)$$

$$y = s \sin \alpha = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

从(1)、(2)中消去 t，可得

$$s \sin \alpha = v_0 \sin \alpha \cdot \frac{s \cos \alpha}{v_0 \cos \alpha} - \frac{1}{2} g \frac{s^2 \cos^2 \alpha}{v_0^2 \cos^2 \alpha}$$

化简后得

$$g \cos^2 \alpha = 2v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha \cos \alpha - 2v_0^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha \quad \text{由此式解出 } s, \text{ 即}$$

$$s = \frac{2v_0^2 \cos \alpha \sin \alpha (\cos \alpha - \sin \alpha)}{g \cos^2 \alpha}$$

若  $\alpha = 0$ ，该式简化为  $s = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$ ，这就是斜抛运动物体落回原高度时的水平射程。

**匀速圆周运动** 做圆周运动的质点，在相等的时间内通过的圆弧长度都相等的运动，做匀速圆周运动的质点其速度大小（即速率）为

$$v = \frac{s}{t}$$

式中 s 为在 t 时间间隔内质点通过的弧长。若质点运动周期为 T（即旋转一周所用时间）则速率也可用下式计算：

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

图中，圆周上有一质点做匀速圆周运动，设在 t 时间间隔内质点由 A 运动到 B，AB 弦的方向就是由 A 到 B 平均速度的方向。当 t 不断减小时，B 点不断向 A 点靠近。当 t → 0，则 AB 弦将变为过 A 点的切线。所以质点在 A 点的即时速度的方向就是 A 点的切线方向。

匀速圆周运动中，圆周上各点的切线方向不断变化，所以做匀速圆周运动的质点的速度方向也不断变化。因此匀速圆周运动是变速运动。

**角速度和线速度** 做匀速圆周运动的质点在 t 时间间隔所转过的弧度数 Δφ 与该时间间隔 t 比值称为角速度。即

$$\omega = \frac{\Delta \phi}{t}$$

角速度的单位是弧度/秒。若用周期表达角速度，则有

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

为了与角速度相对应，做圆周运动的质点的即时速度也称线速度。对匀速圆周运动，线速度的大小为

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{T}$$

由以上两式消去 T 可得  $v = \omega r$

例：图中  $r_1 = 2r_2$ ， $O_1A = \frac{1}{2}r_1$ ，若传送皮带不打滑，则

$$\frac{v_A}{v_B} = \frac{v_C}{v_B} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{1} = 1$$

**向心加速度** 匀速圆周运动是变速运动，所以必然有加速度。由于匀速圆周运动速度大小不变，所以无切线方向的加速度，仅有改变速度方向的法向加速度。对圆周运动，法向加速度必指向圆心，故称向心加速度。

向心加速度的大小可用多种方法确定。

(一) 运动合成分解法。

图(1)中，设质点以速率  $v$  沿顺时针方向做圆周运动，圆周半径为  $r$ ，当从 A 运动到 B 时弦 AB 所表示的位移可看成切向位移 AC 和法向位移 CB 的矢量和。切线方向质点做匀速直线运动，法线方向可视为做初速度为零的匀加速直线运动，其加速度设为  $a$ 。

由几何关系知

$$\overline{AC}^2 = \overline{CB} \cdot \overline{CD} \quad (1)$$

$$\text{即 } (vt)^2 = \overline{CB} \cdot (\overline{CB} + 2r) \quad (2)$$

当  $t \rightarrow 0$  时，有

$$\overline{CB} \ll 2r, \quad \overline{CB} + 2r \approx 2r$$

(2)式变为

$$(vt)^2 = \overline{CB} \cdot 2r \quad (3)$$

由(3)式得

$$\overline{CB} = \frac{1}{2} \frac{v^2}{r} t^2 = \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

$$\text{即得 } a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \quad (4)$$

(二) 极限法。图(2)中，做匀速圆周运动的质点在 A 点时即时速度为  $v_A$ ，在 B 点时即时速度为  $v_B$ ，二者大小相等。将  $v_A$ 、 $v_B$  两速度矢量平移于一起点  $O'$ ，做出速度矢量三角形。在矢量三角形中，

$$a = \frac{180^\circ - \varphi}{2} \quad (1)$$

当  $t \rightarrow 0$  时， $\varphi \rightarrow 0$ ， $180^\circ - \varphi \rightarrow 180^\circ$ ， $a$  的极限方向垂直  $v_A$  并指向圆心。

比较速度矢量三角形及  $\triangle ABO$ ，由相似关系知

$$\frac{v}{v} = \frac{\text{弦}AB}{r} \quad (2)$$

由(2)式得

$$v = \text{弦}AB \cdot \frac{v}{r} \quad (3)$$

用  $t$  除(3)式两端，得

$$\frac{v}{t} = \frac{\text{弦}AB}{t} \cdot \frac{v}{r} \quad (4)$$

当  $t \rightarrow 0$  时, (4) 式左端即为向心加速度的大小,  $\frac{\text{弦}AB}{t}$  即为线速度大小, 故有

$$a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r \quad (5)$$

需要指出, 向心加速度公式  $a = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$  虽然从匀速圆周运动推出, 但也适用于非匀速圆周运动。对非匀速圆周运动, 公式中的  $v$  应为即时线速度的大小, 求得的  $a$  则是即时加速度的大小。

**向心力** 做圆周运动的质点受到指向圆心的作用力。由牛顿第二定律及向心加速度的公式可得

$$F = ma = m \omega^2 r = \frac{mv^2}{r}$$

同向心加速度公式的适用范围一样, 该公式对做匀速圆周运动和非匀速圆周运动的质点都适用, 公式中的  $v$  和  $\omega$  应为即时值。

向心力是根据力的作用效果命名的力。它实际上是做圆周运动的质点受到的径向合力。该合力的方向不断变化但始终指向圆心。在实际问题中, 向心力可以是一个力, 如地球绕太阳做圆周运动的向心力是太阳对地球的吸引力; 向心力也可以是某一个力的分力, 如地面上的物体随地球自转而绕地轴做匀速圆周运动的向心力是地球对物体吸引力的一个分力; 图(1)中, 质量为  $m$  的小球在光滑的倒锥形桶壁上做匀速圆周运动, 它所需的向心力就是重力  $G$  与桶壁支持力  $N$  的合力。该合力的方向指向圆心  $O'$  (不要误认为是  $O$ ), 若桶壁与竖直方向的夹角为  $\theta$ , 则向心力为

$$F = mg \tan \theta = m \omega^2 r = m \frac{v^2}{r}$$

由上式知, 当小球速率增大时, 做圆周运动的半径随之增大, 小球将沿桶壁上升。

向心力公式把做圆周运动质点的运动情况与受力情况联系起来, 如果知道受力情况当然可以确定运动情况; 反之, 如果知道运动情况也可确定受力情况。例如, 在图(2)中, 一粗糙水平圆盘可绕过中心轴  $OO'$  旋转, 现将轻质弹簧的一端固定在圆盘中心, 另一端系住一个质量为  $m$  的物块  $A$ , 设弹簧倔强系数为  $k$ , 弹簧原长为  $l$ 。将物块置于离圆心  $R$  处,  $R > l$ , 圆盘不动, 物块保持静止。现使圆盘从静止开始转动, 并使转速逐渐增大, 物块  $A$  相对圆盘始终未滑动, 当  $\omega$  增大到  $\omega_0 =$

$\sqrt{\frac{5k(R-l)}{4mR}}$  时, 物块  $A$  是否受到圆盘的静摩擦力, 如果受到静摩擦力,

试确定其方向。

对物块  $A$ , 设其所受静摩擦力为零时的临界角度为  $\theta_0$ , 此时向心力仅为弹簧弹力; 若  $\theta > \theta_0$ , 则需要较大的向心力, 故需添加指向圆心的静摩擦力; 若  $\theta < \theta_0$ , 则需要较小的向心力, 物块受到的静摩擦力必背离圆心。

依据向心力公式, 有

$$m \omega^2 R = k(R-l)$$

$$\text{所以 } \omega = \sqrt{\frac{k(R-l)}{mR}}$$

$$\text{因已知 } \omega = \sqrt{\frac{5k(R-l)}{4mR}}$$

得  $\omega > \omega_0$

可见物块 A 所受静摩擦力指向圆心。

从此题可以看出，圆周运动问题仍然是物理基本定律（如牛顿定律）的运用问题，受力分析仍然是解题的关键。

**圆锥摆** 在长为  $l$  的细绳下端拴一个质量为  $m$  的小物体，绳子上端固定，设法使小物体在水平圆周上以大小恒定的速度旋转，细绳就掠过圆锥表面，这就是圆锥摆，如图所示。

从图可知，小球做圆周运动的圆心是  $O'$ ，做圆周运动的半径是  $l \sin \theta$ ，小球所需的向心力实际是绳子拉力  $F$  与重力  $G$  的合力。并有  $F_{\text{合}} = mg \tan \theta = m \omega^2 l \sin \theta$ 。由此式可得

$$\cos \theta = \frac{g}{\omega^2 l}$$

这说明做圆锥运动的小球的摆线与竖直方向的夹角与摆球质量无关，与摆线长度及角速度有关。当摆长一定时，角速度越大， $\theta$  越大。

由于绳子拉力  $F = \frac{mg}{\cos \theta} = \frac{mg}{g/\omega^2 l} = m \omega^2 l$ 。可见绳子拉力随角速度的增加而增大。

小物体旋转一周所经历的时间叫做一个周期，若用  $T$  表示，则  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。从该式及  $\cos \theta = g/\omega^2 l$  中消去  $\omega$  可得  $T = 2\pi \sqrt{l \cos \theta / g}$

该式称为圆锥摆的周期公式。在地球表面同一地点，圆锥摆的周期与  $\sqrt{l \cos \theta}$  成正比，而与小球质量无关。若摆线  $l$  为定长，则  $\theta$  越大， $T$  越大，周期越小。

**离心现象** 做匀速圆周运动的质点受到指向圆心且大小不变的向心力作用，其向心力大小为  $F = m \omega^2 R$ ，当质点受到的向心力减小时，质点将做逐渐远离圆心的运动，若将向心力突然消失，质点将沿圆周切线方向飞出并做匀速直线运动，这种现象叫离心现象。

离心现象是由于向心力不足或向心力消失引起的。不能说是由于质点受到背离圆心的所谓“离心力”而引起的。离心力是做圆周运动的物体对迫使它做圆周运动的另一个（或几个）物体所施加的作用力，它与向心力大小相等、方向相反，相互对应。由于向心力是根据力的作用效果命名的力，它常常是几个力的合力或某一个力的分力，所以不能简单地说离心力就是向心力的反作用力。

离心现象在日常生活中随处可见，自行车或汽车转弯时若车速较大而拐弯又太猛（即圆周运动的半径太小）由于地面给轮胎的摩擦力不足以提供所需的向心力，就可能造成交通事故。利用离心现象人们制成了各种离心机械，如离心脱水机、离心水泵、离心转速计等。

**开普勒三定律** 德国天文学家开普勒在哥白尼地动学说的影响

下，在前人收集的大量关于行星运动的资料的基础上，经过仔细分析、整理和推算，总结出行星运动的三条运动学规律，即开普勒三定律。

第一定律（轨道定律）：一切行星都沿各自的椭圆轨道运行，太阳在该椭圆的一个焦点上。

第二定律（面积定律）：对任何一个行星，它和太阳连线在相等的时间内总是扫过相等的面积。

第三定律（周期定律）：每个行星的椭圆轨道的半长轴的立方跟公转周期的平方的比值都相等，即  $\frac{a^3}{T^2} = k$ ，比值  $k$  是一个与行星无关的恒量。行星运行的椭圆轨道与圆轨道相近，当把行星轨道近似当做圆时，公式中的  $a$  即为圆半径。

开普勒确立的三定律为牛顿创立他的天体动力学理论奠定了实验基础，同时，开普勒也是最早用数学公式表达物理规律并获得成功的人之一，从他所在的时代开始，数学方程就成为表达物理规律的基本方式。

万有引力定律 任何两个物体都是相互吸引的，引力的大小跟两个物体的质量的乘积成正比，跟它们的距离的平方成反比，即

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中的  $G$  叫做万有引力恒量， $G = 6.6732 \times 10^{-11} \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 / \text{千克}^2$ 。

对该定律的理解和应用应注意：

定律适用于计算可视为质点的二个物体之间的相互引力， $r$  指两个质点间的距离。若两物体是质量均匀分布的球体或各层质量均匀分布的球体， $r$  就是两个球心间的距离。

地球可视为各层质量均匀分布的球体，所以地面上质量为  $m$  的物体所受地球的吸引力可表示为  $F = F \frac{Mm}{R^2}$ ，式中  $M$  和  $R$  分别表示地球质量和半径。

在地球表面， $R$  可视为定值，物体的质量不同，所受地球引力也不同，且  $F \propto m$ 。从这个意义上说，质量可以作为万有引力大小的量度。所以万有引力定律涉及的质量称为引力质量。而牛顿定律中的质量称为惯性质量。实验证明，惯性质量与引力质量成正比，若选取适当的单位，惯性质量与引力质量在数值上相等。

天体的质量是巨大的，所以天体之间的万有引力很大，因此万有引力定律是研究天体运动的基本定律，一般质量很小的物体之间的引力十分微小，特别在研究微观粒子时，万有引力一般忽略不计。

万有引力定律的推导 地球及其它行星的公转轨道近似于圆，行星的运动可看成以太阳为中心的匀速圆周运动。设想行星做圆周运动的向心力就是太阳对行星的吸引力，若行星质量为  $m$ ，公转周期为  $T$ ，轨道半径为  $r$ ，由牛顿第二定律可得

$$F = ma_n = m \frac{v^2}{r} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2} \quad (1)$$

从开普勒第三定律  $\frac{r^3}{T^3} = k$  求出  $T$  并代入(1)式，则有

$$F = \frac{4\pi^2 km}{r^2} \quad (2)$$

令  $\mu = 4\pi^2 k$ , (2)式变为

$$F = \mu \frac{m}{r^2} \quad (3)$$

此式说明太阳对行星的引力与它们间的距离成反比, 与该行星的质量成正比, 式中的  $\mu$ , 各个行星都相等, 它是一个与行星无关, 只与太阳性质有关的常量。

进一步研究发现, 卫星绕行星的运动也遵从同样的规律, 这时, (3)式中的  $m$  为卫星的质量,  $r$  是卫星的轨道半径,  $\mu$  则是仅由该行星决定的常量。这说明, 太阳对行星 (如地球) 的作用力与行星对卫星 (如地球对月球) 的作用力属同一性质的力。

牛顿设想地球作用于地面上物体的重力也是这一性质的力。他巧妙地把地面上的重力推广到月球轨道上。月球绕地球的运动可近似看成匀速圆周运动, 设月球运转周期为  $T_{月}$ , 月地距离为  $R$ , 则月球的向心加速度为

$$a_{月} = \frac{4\pi^2}{T^2} R \quad (4)$$

若重力也遵从平方反比规律, 则月球轨道处的重力加速度  $g_{月}$  与地面重力加速度  $g$  的比值为

$$\frac{g_{月}}{g} = \frac{R_{月}^2}{R_0^2} \quad (5)$$

牛顿时代人们已测知  $R_{月} = 60R_0$ 。地球半径  $R_0 = 6370$  公里,  $T = 2.36 \times 10^6$  秒。将这些数据代入(4)、(5)两式, 可得

$$a_{月} = g_{月} = 2.7 \times 10^{-3} \text{米/秒}^2$$

这说明, 地球对地面物体及月球的作用力均遵从平方反比规律, 牛顿设想, 地球对太阳的作用力也应如此, 即

$$F = \mu' \frac{M}{r^2} \quad (6)$$

式中,  $M$  为太阳质量,  $\mu'$  是仅由地球决定的常量。比较(3)、(6)两式, 并运用牛顿第三定律, 可知

$$\mu' \frac{M}{r^2} = \mu \frac{m}{r^2} \quad (7)$$

$$\text{即 } \frac{\mu'}{m} = \frac{\mu}{M} \quad (8)$$

(8)式说明该比值是一个与地球及太阳质量均无关的恒量, 设该比值为  $G$ , 则有  $\mu = GM$ 。将  $\mu = GM$  代入(3)式, 可得

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (9)$$

由于太阳对行星、行星对卫星、地球对地面物体的作用力都遵从(9)式所表达的规律, 牛顿将它做了合理的推广, 即任何两个物体间都存在相互作用的吸引力, 力的方向沿两物体的连线方向, 力的大小与两物体质量的乘积成正比, 与两物体之间的距离的平方成反比, 其数学表达式

仍如(9)式所示。

**天体质量的测定** 地球及其它天体的质量很大，牛顿发现的万有引力定律为计算天体质量提供了可能性。

假定某天体的质量为  $M$ ，有一质量为  $m$  的行星（或卫星）绕该天体做圆周运动，圆周半径为  $r$ ，运行周期为  $T$ ，由于万有引力就是该星体做圆周运动的向心力，故有

$$G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$$

由此式得  $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$ ，若测知  $T$  和  $r$  则可计算出天体质量  $M$ 。

例如：测知月球到地球平均距离为  $r = 3.84 \times 10^8$  米，月球绕地球转动周期  $T = 27.3$  日  $= 2.36 \times 10^6$  秒，万有引力恒量  $G = 6.67 \times 10^{-11}$  牛·米<sup>2</sup>/千克<sup>3</sup>，将数据代入上式可求得地球质量约为  $5.98 \times 10^{24}$  千克。由于地球表面物体的重力近似等于万有引力，所以地球质量还可用下式粗算

$$mg = G \frac{M_{\text{地}} m}{R^2}$$

由此式可得  $M_{\text{地}} = \frac{R^2 g}{G} = 6.0 \times 10^{24}$  千克

**天体密度的测定** 应用万有引力定律测出某天体质量又能测知该天体的半径或直径，就可求出该天体的密度，即

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

例如某登月密封舱在离月球表面 112 千米的空中沿圆形轨道绕月球运行，运行周期为 120.5 分钟，月球半径为 1740 千米，应用万有引力公式算出月球质量为

$$\begin{aligned} M_{\text{月}} &= \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \\ &= \frac{4 \times 3.14^2 \times (0.112 \times 10^6 + 1.74 \times 10^6)^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (120.5 \times 60)^2} \\ &= 7.19 \times 10^{22} \text{ (千克)} \end{aligned}$$

月球平均密度为

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{7.19 \times 10^{22}}{\frac{4}{3} \times 3.14 \times (1.74 \times 10^6)^3} \\ &= 3.26 \times 10^3 \text{ (千克/米}^3\text{)} \end{aligned}$$

如果不易测知天体半径，也可用人造飞行器沿该天体的表面匀速率绕行，设其绕行周期为  $T$ ，公式  $M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$  中的  $r$  恰为天体半径，由此可得天体密度为

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{4\pi^2 r^3 / GT^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3\pi}{GT^2}$$

将此式移项后可得  $\rho T^2 = \frac{3\pi}{G}$ ，所以  $T^2$  是一个普通适用的恒量。

它对任何行星都相同。

例如：依地球引力为向心力，环绕地球表面运行的飞行器的周期为 84.4 分钟。由此可知地球平均密度为

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{3\pi}{GT^2} \\ &= \frac{3 \times 3.14}{6.67 \times 10^{-11} \times (84.4 \times 60)^2} \\ &= 5.5 \times 10^3 \text{ (千克/米}^3\text{)}\end{aligned}$$

**人造地球卫星** 远在牛顿时代，人们就从平抛物体的初速度越大，抛出距离越远的现象推想，如果没有空气阻力，初速度超过某一值时，物体就不会落到地面上，它将绕地球旋转而成为人造地球卫星。

设某物体以速度  $v$  沿地球表面绕地球中心做圆周运动，它做匀速圆周运动的半径是地球半径  $R_0$ ，促使它做圆周运动的向心力即为万有引力且近似等于重力，故有

$$\begin{aligned}mg &= \frac{mv^2}{R_0} \\ v &= \sqrt{R_0 g} = \sqrt{6.4 \times 10^6 \times 9.8} = 7.9 \times 10^3 = 8 \text{ (千米/秒)}\end{aligned}$$

这说明沿地球表面飞行的物体若要不落回地面，必须每秒钟飞行 8 千米。在牛顿时代，使物体达到这样大的速度还不可能，直到 1957 年，原苏联利用多级火箭发射成功了人类第一颗人造地球卫星。

卫星不可能恰好沿地球表面飞行，设卫星距地面高度为  $h$ ，地球半径为  $R$ ，地球质量为  $M$ ，卫星飞行速度为  $v$ 。

$$G \frac{M_m}{(R_0 + h)^2} = \frac{mv^2}{r_0 + h}$$

$$\text{由上式求得 } v = \sqrt{\frac{GM}{R_0 + h}}$$

知道了卫星距离地面的高度，就可确定卫星飞行时的速度大小，例如我国 1970 年 4 月 24 日发射的第一颗人造地球卫星距地面平均高度约为 1412 千米，所以卫星飞行的平均速率约为

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R_0 + h}} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6 \times 10^{24}}{(6.4 + 1.4) \times 10^6} = 7.16 \times 10^3 \text{ (米/秒)}$$

不同高度处人造地球卫星的环绕速度及周期见下表：

高度(千米)	0	300	500	1000	3000	5000	35900 (同步轨道)	380000 (月球轨道)
环绕速度(千米/秒)	7.91	7.73	7.62	7.36	6.53	5.29	2.77	0.97
周期(分)	84.4	90.5	94.5	105	150	201	23小时56分	28天

**近地点和远地点** 人造地球卫星的轨道多数不是圆而是椭圆，地球的球心位于椭圆的一个焦点上，如图所示，当卫星位于图中 P 点时，距离地球表面最近，此位置称为近地点，长轴上的另一顶点 Q 则为远地点。

由开普勒定律可知卫星位于近地点时速率最大，位于远地点时速率最小，由于近地点和远地点处曲率半径相同，所以在近地点。

$$G \frac{mM}{l_{OP}^2} = \frac{mv_P^2}{R}$$

在远地点

$$G \frac{mM}{l_{OQ}^2} = \frac{mv_Q^2}{R}$$

由上面两式右得

$$v_P \cdot v_Q = l_{OQ} \cdot l_{OP}$$

此式说明同一颗卫星在近地点和远地点速率之比等于它们与地球中心距离的倒数。近地点速率大，远地点速率小。在此，不要误认为  $l_{OP}$ 、 $l_{OQ}$  是卫星在近地点和远地点的曲率半径。

**通讯卫星** 用于通讯的人造地球卫星。利用通讯卫星可以实现全球的电视转播，从图上可知，如果能发射三颗相对地面静止的卫星（即同步卫星）并相互联网，即可覆盖全球的每个角落。

欲使人造地球卫星相对地面静止，该卫星的周期必须与地球自转周期相同，并且该卫星必须位于赤道上空。如果仅与地球自转周期相同而不定点于赤道上空，该卫星就不能与地面保持相对静止。因为卫星轨道所在平面必然和地球球体的大圆所在平面重合。

同步卫星的周期为

$$T = 24 \times 3600 \text{ 秒} = 86400 \text{ 秒}$$

设同步卫星距地面高度为  $h$ ，地球半径为  $R_0$ ，地球质量为  $M$ ，据万有引力定律及向心力公式，有

$$m \frac{4\pi^2}{T^2} (R_0 + h) = G \frac{mM}{(R_0 + h)^2}$$

由此式可得

$$R_0 + h = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.0 \times 10^{24} \times 86400^2}{4 \times 3.14^2}}$$

$$=4.23 \times 10^7 \text{ (米)}$$

进而可知卫星高度  $h=3.59 \times 10^7$  米。

卫星运行的速率为

$$v = \frac{2\pi(R_0 + h)}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times 4.23 \times 10^7}{86400}$$

$$=3.07 \times 10^3 \text{ 米/秒}$$

由于通讯卫星都必须位于赤道上空  $3.6 \times 10^7$  米处，各卫星之间又不能相距太近，所以，通过卫星的总数是有限的。设想在赤道所在平面内，以地球中心为圆心每隔  $5^\circ$  放置一颗通讯卫星，全球通讯卫星的总数应为 72 个。

宇宙速度环绕地球做匀速圆周运动的人造卫星高度不同，其环绕速度也不同。沿地球表面做匀速圆周运动的卫星其速率为  $v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R_0}} =$

7.9 千米 / 秒。该速度是在地面处发射并能绕地球运动的最小速度，我们称它为第一宇宙速度。

当从地面发射的卫星速度略大于第一宇宙速度时，该卫星的轨道为椭圆，地球位于椭圆轨道的一个焦点上。如果想使人造星体脱离地球约束而成为绕太阳旋转的人造行星，就必须使星体具有脱离地球引力范围的初动能。由引力理论可知，质量为  $m$  的物体在地面处的引力势能为  $E_p$

$$= -G \frac{mM}{R_0}。式中，M 为地球质量， $R_0$  为地球半径，由于距地球无限远$$

处的引力势能规定为零，故地面处的引力势能为负值。欲使位于地面质量为  $m$  的人造星体脱离地球引力范围，它飞离地面时的动能至少为

$$E_k = |E_p| = G \frac{mM}{R_0}$$

$$\text{即 } \frac{1}{2}mv^2 = G \frac{mM}{R_0}$$

由此式可得

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}} = \sqrt{2}v_1 = 11.2 \text{ (千米 / 秒)}$$

这个速度称为第二宇宙速度，又称逃逸速度。如果从地面发射的人造星体既能脱离地球束缚，又能脱离太阳束缚逃到太阳系之外，这种人造星体所具有的速度叫第三宇宙速度。由引力理论和能量关系可以证明，第三宇宙速度  $v_3=16.4$  (千米 / 秒)。

功 一个物体受到恒力的作用并且在力的方向上发生一段位移，我们就说这个力对物体做了功。如果作用力是恒力，该力所做的功可表述为

$$W = Fscos$$

式中  $\theta$  表示  $F$  与  $s$  之间的夹角，如图所示。

功是标量。在国际单位制中，功的单位是焦耳，简称焦。

$$1 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 牛} \times 1 \text{ 米} = 1 \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

学习和理解功的概念时要注意下面几点：力和在力的方向的位移

是做功的两个不可缺少的因素。有力的作用并不一定该力就做功。例如人扛着沉重的箱子在平直路面前进，肩膀对箱子的支持力就始终不做功。

位移  $s$  是指力的作用点的位移，它与物体的位移不一定相同。

用  $W = Fscos$  计算功时其中的  $F$  应为恒力，即力的大小和方向都不变。

由于位移与参照系的选取有关，所以功也与参照系有关。计算功时应取静止的物体做参照，通常以地面做参照。

力对物体做功的过程，就是能量从一种形式转化为另一形式的过程。从这个意义上说：功是能量转换的量度。（功是量度能量转换的基本物理量。）计算功的几种方法 公式法。即用  $W = Fscos$  计算功。

图象法，当力  $F$  和位移  $s$  在一条直线上时，也可利用图象计算功，如图(1)所示，图象下所包围的“面积”即表示功。

用图象法还可以计算变力的功，如图(2)所示。图象下所包围的“面积”仍然表示功。 $s$  轴上方的“面积”表示正功， $s$  轴下方的“面积”表示负功。总功等于正功与负功的代数和。

功是能量转换的量度，所以从能量转换的趋向及数值大小也可计算功（见“功能关系”）。

正功和负功 在功的计算式  $W = Fscos$  中，

若  $< 90^\circ$ ， $W$  为正，力对物体做正功。该力常称为动力，正功又称动力功。

若  $> 90^\circ$ ， $W$  为负，力对物体做负功，或者说物体克服阻力做功，所以负功又称阻力功。

若  $= 90^\circ$ ， $W = 0$ ，力对物体不做功。如在匀速圆周运动中，向心力的方向始终与速度方向垂直，物体在力的方向上的位移始终为零，所以向心力始终不对物体做功。

正功和负功的代数和叫总功，若物体可视为质点，总功等于合外力对物体所做的功。

摩擦力做功的特点 用水平的外力推桌子，使桌子在地面上滑行，桌子受到的滑动摩擦力与位移方向相反，这时滑动摩擦力对桌子做负功。滑动摩擦力也可以对物体做正功，如图(1)中，传动带在动力驱使下匀速运动，当煤从漏斗落到传送带的瞬间，煤块的水平速度为零，煤块相对传送带向后滑动，因而受到向前的滑动摩擦力作用。以地面为参照，煤块所受滑动摩擦力方向与位移方向相同，所以滑动摩擦力对煤块做正功，煤块的速度和动能不断增大。当煤块速度相对传送带为零时，滑动摩擦力减为零。

用水平外力推桌子但未推动，此时桌子所受摩擦力为静摩擦力。由于桌子相对地面位移为零，所以静摩擦力对桌子不做功。

静摩擦力也可以对物体做正功。例如，图(2)中若工件相对传送带静止并随传送带一起匀速上升，静摩擦力对工件做正功。若工件随传送带一起匀速下阵，静摩擦力对工件做负功。

综上所述，静摩擦或滑动摩擦力既可以做正功，也可以做负功。这里，重要的是分清力的方向与位移方向的关系，绝不可主观臆断并错误认为滑动摩擦力必做负功，静摩擦力不做功。

例如，在图(3)中，M 置于光滑水平面上，m（可视为质点）置于 M 之上并受到水平拉力 F 的作用，m 与 M 之间的滑动摩擦系数  $\mu$ ，当 m 从 M 的左边缘滑至右边缘时，M 滑动距离为 s，若 m 滑行的长度为 s，由此可知拉力 F 做的功为  $W_F = F \cdot (s + s)$ ；滑动摩擦力对 m 做的负功  $W_{f2} = -\mu mg (s + s)$ ，滑动摩擦力对 M 做的正功  $W_{f1} = \mu mgs$ 。外力对 m 所做的合功为

$$W_n = W_F + W_{f1} = (F - \mu mg) (s + s)$$

**功率、平均功率、即时功率** 功与完成这些功所用时间的比值叫功率，即  $P = \frac{W}{t}$ 。

功率是描述做功快慢的物理量，它在数值上等于单位时间完成的功。

在国际单位制中，功率的单位是瓦特。1瓦特 =  $\frac{1\text{焦耳}}{1\text{秒}}$ 。千瓦、马力也是功率常用的单位，1千瓦=1000瓦特。1马力=735瓦特。

$$\begin{aligned} \text{由 } W = Fscos\theta \text{ 和 } P = \frac{W}{t} \text{ 可得} \\ p = \frac{Fscos\theta}{t} = F \cdot \bar{v}cos\theta \end{aligned}$$

若公式中的  $\bar{v}$  取即时速度，F 为对应时刻的作用力，则所得功率为即时功率，即

$$P_t = F \cdot v_t \cos\theta$$

若力和速度在一条直线上，上式可简化为  $P_t = F \cdot v_t$ 。例如：自由落体运动的物体下落 t 秒时的即时功率为  $P = mg \cdot v_t = mg \cdot gt = mg^2 t$ ，t 秒内的平均功率为  $\bar{P} = mg\bar{v} = mg(0 + gt) / 2 = \frac{1}{2} mg^2 t$ 。

由公式  $P = Fv_t$ ，可知，当功率一定时，即时速度越大，则作用力越小；反之，作用力越大，速度越小。汽车上坡时要慢速行驶就是这个原因。

从公式出发，似乎可以得出  $F \rightarrow 0$  时， $v_t \rightarrow \infty$  的结论。但实际运行的各种机械都不可能不受阻力，同时机械的各个部件都有一个机械强度的限制，不可能使速度无限制的增大。所以，一般机械（如汽车）在指出最大的输出功率的同时都有一个最大速度（如车速）和最大作用力（如牵引力）的限制。

**额定功率和实际功率** 机械（如发动机）在正常工作时的最大功率叫额定功率。例如：一般小轿车的额定功率在 90~220 马力之间，竞赛汽车发动机的额定功率则可达 500~1200 马力。这里，“正常工作”是指速度及作用力均不超过最大值的情况。如某载重汽车，车货共重 10 吨，额定功率为 100 马力，在平直公路上行驶时，所受最大阻力为车重的 0.05 倍，则该车所能达到的最大速度为

$$\begin{aligned} v_m = \frac{P}{F} = \frac{P}{f} = \frac{100 \times 735}{10 \times 10^3 \times 10 \times 0.05} \\ = 14.7 \text{ 米/秒} = 53 \text{ 千米/小时} \end{aligned}$$

机械在实际工作时的功率即实际功率不可能总是等于额定功率，如

空载的机车其实际功率小于额定功率，超过额定功率时，机械便处于超负荷运行状态，这样会使机械损坏或降低使用寿命。

**机械效率** 机械输出的有用功与外界输入给机械的总功的比值。即

$$= \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} \times 100\%$$

由于输入的总功与输出的有用功在时间上是对应的，所以上式经常表达为

$$= \frac{W_{\text{有用}}}{W_{\text{总}}} = \frac{P_{\text{有}}}{P_{\text{总}}} \times 100\%$$

使用机械总可以获得某种增益或效益。如使用滑轮组可以用较小的力获取较大的力。使用泵可以把井下的水送上水塔。但是从做功的角度考虑，任何机械都只有“亏损”而无“赢利”，所以机械效率总是小于1。

利用上面机械效率的表达式可进行有关量的计算，如一台效率为的抽水机，扬程为  $h$  米，耗电功率为  $P$  瓦特，据此可以计算水泵的流量。设经  $t$  秒抽出水的质量为  $m$ ，则

$$Pt = mgh$$

$$\text{又 } m = \rho_{\text{水}} V, Q = \frac{V}{t}$$

从上可得水泵流量为

$$Q = \frac{P\eta}{\rho_{\text{水}}gh}$$

**能量** 能量概念及其转化规律是物理学中极为重要的概念和规律。对能量概念的理解应从不同角度、不同层次来逐步加深。

能量和功有紧密联系，如果一物体能够对外界做功，我们就说这个物体具有能量。能量总是与物体的某一运动状态相联系，并且与运动状态存在——对应的关系。所以，能量由物体的运动状态决定，能量是状态量。

但是，要定量地确定能量，一般不是从运动状态出发，而是从运动状态的改变出发。因为只有当能量发生转化、转移、释放或吸收时才便于测量它。因此，我们可以用做功的多少来确定能量变化的多少。一个物体做了多少功，它的能量就变化多少。在同种条件下（如从同一高度自由释放质量不同的两个物体，使其落到地面），如果甲物体做的功比乙物体多，则甲物体具有的同种形式的能量就多。可见，能量是描述物体做功本领大小的物理量。

在国际单位制中，能量的单位和功相同，都是焦耳。能量不能脱离物体而单独存在。并且与物体的质量相对应。爱因斯坦经过精心的理论探索，确定了能量与质量的对应关系，这就是爱因斯坦质能方程。（见原子物理部分）

**动能** 物体由于运动而具有的能量。它与物体的运动速度及质量有关即

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

式中  $m$  是物体的质量， $v$  是物体速度的大小， $E_k$  表示物体的动能。

动能是标量，且恒为正值，同一物体速度方向变化。但如果速度大小始终不变，其动能就不变。例如，做匀速圆周运动的物体的动能就不发生变化。

动能表达式中的  $v$  是物体即时速度的大小，与平均速度对应的所谓“平均动能”无意义。

速度是相对的，由  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  所确定的动能大小也是相对的。通常我们以地面做参照计算物体的动能。人坐在正在行驶的火车上，相对火车人的速度为零，但相对地面，人的速度不是零，所以人的动能也不是零。

**动能定理** 表述功和动能关系的定律。对单个物体，动能定理可表述为：外力对物体所做的总功等于物体动能的增量，即

$$W_{\text{总}} = E_{k2} - E_{k1}$$

公式中的“总功”是指所有外力对物体做功的代数和，这些外力可以同时作用，也可以不同时作用。“增量”是指物体末状态的动能与初状态动能的差值，若  $E_{k2} < E_{k1}$ ，则动能增量为负值。

动能定理可从动能和功的概念出发，以物体受恒力作用为例，从牛顿第二定律推出。但是，它也适用于变力做功的情况。例如，图中质量为  $m$  的物体从倾角为  $\alpha$ 、长为  $s_1$  的不光滑斜面顶端无初速滑下，在水平面上滑行  $s_2$  后又停止运动。欲求摩擦力做功，则可利用动能定理。

以开始滑下的瞬时为初态，以物体停止运动为末态，摩擦力和重力做的功分别用  $W_f$  和  $W_G$  表示，由动能定理可得

$$W_f + W_G = E_{k2} - E_{k1} = 0$$

由此式可得

$$\begin{aligned} W_f &= -W_G = -mgs_1 \cos(90^\circ - \alpha) \\ &= -mgs_1 \sin \alpha \end{aligned}$$

**势能** 举高的重锤，拉伸的弹簧都可以做功，它们做功的过程有一个共同的特点，即功与路径无关。

图中，质量为  $m$  的物体从距地面高度为  $h$  的 A 点分别沿折线 ABC 和斜线 AC 运动到 C 点，斜线 AC 与水平面的夹角为  $\alpha$ 。由功的计算式可得

$$\begin{aligned} W_{ABC} &= W_{AB} + W_{BC} \\ &= mgh + 0 = mgh \\ W_{AC} &= mgAC \cos(90^\circ - \alpha) \\ &= mgAC \sin \alpha \\ &= mgh \end{aligned}$$

可见， $W_{ABC} = W_{AC}$ ，这说明，重力的功仅由起点和终点的位置决定，与其运动路径无关。在图中，如果将物体沿 ABCA 绕行一周，重力所做的功显然等于零。其实，在重力场中，将物体沿任意路径绕行一周，重力在整个过程中所做的总功恒等于零。

弹力的功与重力的功具有相同的特点。物体能够做功，我们就说它具有能。重力的功的大小由物体相对地面的高度决定，同一物体在同一高度处，做功的能力大小具有唯一性，拉伸到某一长度的弹簧也是这样。

因此，人们可以引入势能这一概念来表征举高的重物及拉伸的弹簧做功能力的大小。并把举高的重物所具有的势能叫重力势能，把拉伸（或压缩）的弹簧所具有的势能叫弹性势能。摩擦力的功与路径有关。把小铁块在不光滑的桌面上绕行一周，摩擦力做的功并不为零，所以，不存在“摩擦力势能”。

**重力势能的大小** 重力势能是状态量，对同一物体，它是状态的函数。物体与地球相对位置发生变化，其势能就发生变化，这种变化可以用重力功来量度。设  $E_{p0}$  和  $E_p$  分别为物体在初、末两状态的势能， $W_p$  示重力所做的功。由功和能量转化的关系可得

$$W_p = E_{p0} - E_p = -(E_p - E_{p0}) \quad (1)$$

此式说明，重力的功等于物体势能增量的负值，即，重力对物体做正功，物体势能减少；重力对物体做负功，物体势能增加。重力对物体做 1 焦耳的正功，物体势能就减少 1 焦耳。

由(1)式可得

$$E_p = E_{p0} - W_p \quad (2)$$

若取物体在初状态时势能为零，即  $E_{p0} = 0$ ，(2)式变为

$$E_p = -W_p \quad (3)$$

在地球表面附近，重力可视为恒力，即  $G = mg$ 。若物体的末态位置比初态位置高  $h$ ，将物体由初态位置移到末态位置重力做功为  $E_p = mgh$  (4)

可见，此式是在把重力视为恒力，并把物体的初态位为重力功等于重力势能，显然是错误的。功是过程量，而重力势能是状态量，重力功与重力势能的变化相对应，而不是与重力势能相对应。

需要指出，重力势能为物体与地球所共有，上面仅提物体的势能，这是以地球为参照时的一种简便的处理。

重力势能是相对的，它与零势能点的选取有关。图中，质量为  $m$  的物体位于距地面高为  $h_1$  的 A 点，以地面为势能零位置，物体势能为  $mgh_1$ 。以桌面为势能零位置则物体势能为  $mgh_2$ ，但是无论取地面或桌面势能零位置，当物体由 A 落到桌面时，势能变化量均相同，即  $E_p = mgh_2$ 。

弹性势能的大小重大势能的变化可以用重力功来量度。弹性势能的变化也可以用弹力功来量度。即  $W_p = -(E_p - E_{p0})$  (1)

若取  $E_{p0} = 0$  则有

$$E_p = -W_p \quad (2)$$

由胡克定律知弹力  $F = -kx$ ，负号表示弹力的方向与弹簧形变的位移方向相

反。取  $x$  为自变量， $F$  为函数，可得图所示图象。图线的斜率表示弹簧的倔强系数。由变力功的计算可知，图线下所包围的面积表示变力的功。当弹簧的形变为  $x$  时，弹力所做的功为  $W = \frac{1}{2} kx^2$  (3)

$$\text{由(2)、(3)式可得 } E_p = -W_p = \frac{1}{2} kx^2 \quad (4)$$

式中  $x$  表示弹簧从原长伸长或压缩的长度。即从平衡位置算起的位移。当选定弹簧原长为零势能点时，无论弹簧是伸长还是压缩，其弹性

势能均为正值。

**机械能守恒的条件** 物体在自由下落时，重力对物体做正功，物体重力势能不断减少，而物体的速度不断增大，动能也不断增大。在这一过程中，势能转化为动能。在图(1)中，质量为  $m$  的物块，沿光滑圆弧面滑下，设物块在位置 1 时速度为  $v_1$ ，在位置 2 时速度为  $v_2$ ，两处高度分别为  $h_1$  和  $h_2$ 。物块由位置 1 滑到位置 2 的过程中，重力做功为  $W_G = mgh_1 - mgh_2$  (1)

由于接触面光滑，支持力始终不做功，由动能定理知

$$W_G = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2)$$

由(1)、(2)式可得  $\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1$  (3)

(3)式说明，在只有重力对物体做功时，在任何时刻动能和势能的总和即物体的机械能保持不变。

图(2)中，将一个重物置于原长为  $l$  的弹簧上，重物压缩弹簧时，弹簧弹力对物体做负功，弹簧弹性势能增加；重物位置降低，重力对物体做正功，重力势能减少；在重力大于弹力时，重物动能不断增加，在重力小于弹力时，重物动能又不断减少。只要不超过弹性限度，可以证明，在全过程的任一时刻，重力势能、弹性势能和物体动能的总和保持不变。

上面两个实例说明，一个物体系统，如果只有重力和弹力做功，在发生动能和势能的转化时，机械能的总量保持不变。这一规律称为机械能守恒定律。

**运用机械能守恒定律解题思路** 运用机械能守恒定律解题时，首先应确定研究对象，研究对象可以是一个物体与地球组成的系统，也可以是几个物体与地球组成的系统；其次是分析受力情况和做功情况，如果仅有重力和弹力做功，才能考虑应用该定律；第三步应根据题意确定初末状态，并选取合适的位置做势能零点；最后使用守恒定律列出方程或方程组求解。

例如，图中所示游乐场过山车大圆环的直径  $R=5$  米，试求放行点 A 的高度至少为多少？

以过山车为研究对象，欲使车安全运行，过山车必须始终不脱离轨道。设过山车达 B 点时轨道对车轮压力恰好为零。此时重力即为向心力，故有

$$mg = \frac{mv_B^2}{R} \quad (1)$$

选 A 为初态位置，B 为末态位置，若摩擦力忽略不计，车从 A 到 B 符合机械能守恒的条件，由此可得  $mgh = 2mgR + \frac{1}{2}mv_B^2$  (2)

由(1)、(2)式解得  $h = \frac{5}{2}R$ 。

有时，研究对象的选取与守恒条件的分析需综合考虑，选某一个或两个物体为对象机械能可能不守恒，如将研究对象的范围扩大一些可能就符合守恒条件。

**功能关系** 重力、弹力之外的其它力对物体或物体系做多少功，物体或物体系的机械能就变化多少，这就是功能原理，可用公式表达为

$$W_{\text{其它}}=E_2-E_1$$

式中， $W_{\text{其它}}$ 表示重力、弹力之外的其它各力对物体或物体系做功的代数和。 $E_1$ 、 $E_2$ 分别表示初、末状态的机械能。

功是能量转换的量度。单个物体动能的增加（或减少）必然伴随着其它能量的减少（或增加），其变化的数量可用物体所受诸外力合功的值量度。物体系内势能的增加（或减少）必然随着其它能量的减少（或增加），其势能的变化量可用重力功和弹力功来量度。物体系机械能的增加（或减少）必然伴随着其它物体能量的减少（或增加），其变化量可用重力和弹力之外的其它力的功来量度。从功和能的关系角度分析，动能定理、机械能守恒定律及功能原理并无本质差别，所以，我们可将它们统称为功能关系，并用公式  $W = \Delta E$  概括表示。

**冲量** 描述力对时间积累效应的物理量。物体在时间间隔  $t$  内受到恒力  $F$  的作用，该力的冲量为  $I = Ft$ 。冲量是矢量，它的方向与力  $F$  的方向相同。在国际单位制中，冲量的单位是牛顿·秒。

如果物体在时间  $t$  内受几个恒力的作用，则合外力的冲量等于各力冲量的矢量和，其合成规律遵守平行四边形法则。

冲量与功有某种对应关系，它们都表述力的积累效应，都是过程量，但各自反映积累效应的不同侧面。冲量是力对时间的积累效应，功是力对空间的积累效应；冲量是矢量，而功是标量；合外力的冲量等于各分力冲量的矢量和，但合外力的功并不一定等于各分力的功的代数和，只有当物体可视为质点时，合外力的功才等于各分力功的代数和。两个物体间的作用力与反作用力总是大小相等、方向相反，同时存在、同时消失。所以作用力的冲量与反作用力的冲量总是等值、反向并在同一条直线上。但是作用力的功与反作用力的功不一定相等。对物体系，内力冲量的矢量和等于零，但内力的功的代数和不一定为零。例如，有人在船上行走时，人对船的作用力与船对人的反作用力的冲量的矢量和等于零，但是人对船的作用力对船做正功使船由静止变为运动，船对人的反作用力对人做正功使人与船反向运动。

**动量** 物体机械运动的一种量度。它是和物体运动速度相关的状态量。

动量是矢量，其方向就是即时速度的方向，动量的大小等于物体的质量和物体即时速度的乘积，即  $p = mv$ 。

在国际单位制中，动量的单位是千克·米/秒。

速度是相对的，动量也是相对的，我们一般取地面或相对地面静止的物体做参照物来确定动量的大小和方向。

动量和动能都是与速度相关的状态量，但二者又截然不同。动量是矢量，而动能是标量；动量反映只在物体间相互传递、转移的机械运动量，而动能所反映的是可以转化为热、光、电等其它形式运动量（热能、光能、电能等）的机械运动量；动量的改变与力的时间积累过程相对应。

动能的改变与力的空间积累过程相对应。所以，动量  $mv$  和动能  $\frac{1}{2}mv^2$

分别从不同侧面反映和表征机械运动的量。这两个概念的确立，不是人们的主观臆想，而是基于客观存在的物理事实。质量为  $m$  的物体以速度  $v$  做匀速圆周运动时，若转过  $1/4$  圆周，其动能的变化等于零。因为向心力始终对物体不做功；但物体动量的变化不等于零。由矢量运算可知  $p = \sqrt{2}mv$ ，这是因为在这段时间间隔内，向心力的冲量不等于零。

**动量定理** 当外力的冲量施于物体时，物体的动量必发生变化。在图中，质量为  $m$  的物体受恒力  $F$  作用，经  $t$  秒后速度由  $v_0$  变为  $v_t$ ，据牛顿第二定律及运动学公式  $F=ma$   $v_t - v_0 = at$  可得

$$Ft = mv_t - mv_0$$

此式左边为合外力冲量，右边为物体动量的变化。这说明物体所受合外力的冲量等于物体动量的变化，可写为  $I = \Delta p$ 。这一规律称为动量定理。

运用动量定理需要注意：

(1) 动量是矢量，动量的变化应按矢量的运算法则求得。若  $v_0$ 、 $v_t$  在一条直线上，则在规定正方向之后，其矢量运算可转化为代数运算。如质量 1 千克的足球以 10 米/秒的速度撞击墙壁，又以 8 米/秒的速度反向弹回，如果我们选初动量方向为正方向，则其动量的变化为

$$\Delta p = mv_t - mv_0 = 1 \times (-8) - 1 \times 10 = -18 \text{ (千克} \cdot \text{米/秒)}$$

$\Delta p = -18$  千克·米/秒表示动量的变化量与初动量反向。

(2) 动量定理中的  $I$  表示物体所受合外力的冲量，冲量也是矢量。 $I = \Delta p$  不仅表示合外力的冲量与动量的变化量大小相等，同时表示二者的方向始终一致。合外力冲量的方向与初动量及末动量的方向无直接联系，它只与动量变化量的方向一致。

(3) 动量定理中的合外力可以是恒力，也可以是变力。在合外力为变力时， $F$  可视为在时间间隔  $t$  内的平均作用力。如用锤将钉子打入木板时，锤对钉子的作用就是平均作用力。

(4) 动量定理的研究对象一般是单个物体，由于物体系统中的内力总是成对出现，而每对作用力与反作用力的冲量总是大小相等、方向相反。若以物体系统为研究对象，内力冲量的矢量和始终为零。据此可知，动量定理的研究对象可推广到物体系统。即物体系统所受合外力的冲量等于物体系统内各物体动量变化量的矢量和。

**运用动量定理解题思路** 运用动量定理解题主要是处理好可否用与如何用的问题。

动量定理可由牛顿第二定律推导得出。所以不少问题用牛顿定律和动量定理都可求解。但对作用时间很短，瞬时作用力难于确定的问题，运用动量定理解答较为方便。如将夯打进泥土问题，子弹打木块的问题等一般应考虑运用动量定理。

动量定理与功能定理有其相似性，它们都反映了力的积累效应，都是建立了过程量与瞬时量变化的对应关系。但是，动能定理是标量式，动量定理是矢量式。在某些需要确定矢量方向的题目中就需考虑运用动量定理。有些表面看属动能定理的问题。实质上需用动量定理解答。如图，传送带以 1 米/秒的速度匀速前进，传送带上方的煤斗送煤流量为 50 千克/秒，那么传送带的功率应为多少？

煤斗的送煤量为 50 千克/秒，若煤在传送带上无堆积，传送带必须在 1 秒钟内使 50 千克的煤达到与传送带相同的速度。

若用动能定理求解，并认为传送带每秒做的功恰等于煤增加的动能，则有

$$W = E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 50 \times 1^2 = 25 \text{ (焦耳)}$$

$$\text{由此得出传送带功率为 } P = \frac{W}{t} = \frac{25 \text{焦耳}}{1} = 25 \text{瓦}$$

若用动量定理，则有

$$Ft = p$$

取  $t=1$  秒，由上式得

$$F = \frac{p}{t} = \frac{mv - 0}{t} = mv$$

所以传送带功率

$$P = Fv = mv^2 = 50 \text{ 瓦}$$

这两种解法后者是正确的，前者是错误的，错误原因是忽略了传送带与煤之间在初始阶段有相对位移。传送带所做的功并非全部用来增加煤的动能。其中有一部分摩擦力做功转化为煤和传送带的内能。其产生的内能为  $Q = f \cdot s$ ，式中  $s$  表示煤块与传送带间的相对位移。

在确定了条件符合可用动量定理之后，除了“动量定理”条目中提及的注意点之外，还需考虑研究对象的选取，总动量的计算技巧以及初末状态的合理确定等。动量守恒的条件当系统不受外力或所受合外力为零时，系统的总动量保持不变。这就是动量守恒定律。图(1)中，A、B 两物体在光滑的水平面上匀速相向运动，两物体的动量大小分别为  $P_A$  和  $P_B$ ，某时刻两物体相互碰撞，碰撞后运动方向仍在一直线上，其动量分别变为  $P_A'$  和  $P_B'$ 。设其相互作用力分别为  $F$  和  $F'$ ，作用时间为  $t$ ，由于

$$F = -F' \text{ 所以}$$

$$Ft = F't' \quad (1)$$

由动量定理可得

$$Ft = p_A' - p_A, \quad F't' = p_B' - p_B, \text{ 代入(1)式则}$$

$$p_A' - p_A = -(p_B' - p_B) \quad (2)$$

$$\text{即 } p_A' + p_B' = p_A + p_B$$

等式右边碰撞前系统的总动量，等式左边为碰撞后系统的总动量。此式说明，碰撞前后系统内两物体的动量都发生了变化，但系统的总动量保持不变，即动量守恒。在这一碰撞过程中，A、B 间的作用力属于内力，系统所受合外力为零。

动量守恒定律虽然可以从牛顿定律推出。但是大量实验事实证明，它是独立于牛顿定律之外的，具有更加广泛意义的物理规律。

动量守恒的条件是系统不受外力或所受合外力为零。但在解决实际问题时，如果外力远小于内力，且外力作用时间极短，也可忽略外力作用而运用动量守恒定律，例如在列车编组中，用一节运动的车箱去碰撞另一节静止的车厢并结合为一体，在二车箱碰撞并结合的短暂时间内，

车箱与路轨间的摩擦力比两车箱相互碰撞的作用力小很多，故可在碰撞过程中运用动量守恒定律。

与机械能守恒定律不同，动量守恒定律的显著特点是它的矢量性，这可能给初学者运用该规律带来较多的麻烦，但是，正是它所具有的矢量性，使我们可以某一方向上单独使用它。例如在图(2)中，小车 M 置于水平光滑的轨道上。小球用不可伸长的绳子系于车上。当将小球从悬线水平的位置由静止释放后，小球和小车组成的物体系统机械能守恒，但系统动量不守恒，因为系统所受合外力不等于零。但在水平方向上，系统所受合外力为零。所以可在水平方向上对系统运用动量守恒定律。如若在小车的左侧立一挡板，如图(3)所示，则在小球 m 摆至最低位置前系统水平方向动量不守恒。但当小球从最低位置继续向右摆动时，挡板与小车 M 间无相互作用力，故可对系统从小球由最低点向右摆动的过程运用水平方向动量守恒的规律。当小球摆至右侧最高位置时，小球和小车具有共同的水平向右的速度 V，如图(4)所示。由动量守恒规律得

$$mv = (m+M)V$$

式中 v 为小球在最低位置时的速度，由于机械能守恒，所以  $v = \sqrt{2gl}$ ，将 v 代入上式，V 可求得  $V = \frac{m}{m+M} \sqrt{2gl}$

$$V = \frac{m}{m+M} \sqrt{2gl}$$

小球从最低点摆至右侧最高位置的过程，系统机械能仍守恒。所以有

$$mgl = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(m+M)v^2 + mg(l - l\cos\theta)$$

由此式可求得小球向右摆动的最大偏角  $\theta$ ，即  $\theta = \cos^{-1} \frac{m}{m+M}$ 。

碰撞两个物体相互作用的时间极短，作用力又很大，其它作用力相对很小，这就是常见的碰撞现象。在碰撞现象中，把参与碰撞的物体作为一个系统。可以认为系统仅有内力作用。故系统动量守恒。相互碰撞的物体，若接触面的法线通过两物体的重心，碰撞前后两物体的速度均在一条直线上，这样的碰撞叫正碰，否则叫斜碰。对于正碰的两个物体，动量守恒的矢量运算可以简化为用正负号表达的代数运算，若碰撞前两物体动量分别为  $P_1$  和  $P_2$ ，碰撞后其动量分别为  $P_1'$  和  $P_2'$ ，则有

$$P_1 + P_2 = P_1' + P_2'$$

从碰撞开始到碰撞结束，系统初末两态动能若无损失，则称为弹性碰撞；若有动能损失，则为非弹性碰撞。在非弹性碰撞中，若碰撞后二物体结合在一起，这时系统动能损失最大，这种碰撞叫完全非弹性碰撞。在处理实际问题时，若碰撞中损失的动能很小（如钢球、玻璃球间的碰撞）则可视为弹性碰撞。

**弹性碰撞** 图中  $m_1$ 、 $m_2$  为大小相等的两钢性球。两球置于光滑水平面上。 $m_1$  的速度为  $v_1$ ， $m_2$  的速度为零。设两球发生弹性正碰。

第一阶段，两球接触后均被压缩而发生形变，形变产生的弹力使  $m_1$  减速， $m_2$  则被加速，直到两球速度相等（即相对速度为零）时压缩量达到最大，这一阶段称为压缩阶段。在压缩阶段系统动能逐渐减少，而系统势能逐渐增大。两球速度相等时，系统势能达到最大，而系统动能减

至最小。但是整个过程的任一时刻，系统的机械能保持不变。

第二阶段，由于两球间弹力作用， $m_1$  继续减速， $m_2$  继续加速。从而使  $m_2$  的速度大于  $m_1$  的速度，两球形变逐渐减小，当两球即将分离的瞬间，形变完全消失。这一阶段称为恢复阶段。在恢复阶段，系统的弹性势能逐渐减小，系统的动能逐渐增大。当形变完全消失时，系统势能为零，而系统动能重新达到最大。

若取两球开始接触的瞬间为初态，两球分离时为末态，系统的总动能应等于初态时的总动能，故有

$$\frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + 0 \quad (1)$$

由于系统无外力作用，故系统动量守恒，从而可得

$$m_1 v_1 + 0 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad (2)$$

由(1)、(2)两式解得

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$$
$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

从上面两式可知， $v_2'$  的方向始终与  $v_1$  相同。当  $m_1 > m_2$  时， $v_1'$  与  $v_1$  方向相同，当  $m_1 < m_2$  时， $v_1'$  与  $v_1$  反向。

若  $m_1 = m_2$ ，则  $v_1' = 0$ ， $v_2' = v_1$ ，即碰撞后两球交换速度。

若  $m_2 \gg m_1$ ，则  $v_1' = -v_1$ 。即碰撞后  $m_1$  等速反向运动。

**机械振动** 物体（或物体的一部分）在某一中心位置两侧做往复运动，就叫做机械振动，简称为振动。

振动是物体运动的基本形式之一，它在自然界广泛存在。例如机械钟摆的摆动，发动机活塞的往复运动等都是机械振动。自然界中一切具有弹性的物体都可产生振动。振动既可以造福于人类，例如振动打桩机、按摩器、共振筛等，又可能造成不良的后果，消耗不应消耗的能量，甚至会引起机器上机器零件的“疲劳”发生事故。

振动是产生波的根源，只有有了振源的振动，才会发生振动在媒质中的传播，即波的传播。

**简谐振动** 简谐振动是最简单、最基本的机械振动。物体在跟位移成正比，并且方向总是指向平衡位置的回复力的作用下所作的振动叫简谐振动，也就是当物体在  $F = -kx$  的回复力作用下的运动，式中  $k$  为常数， $x$  为以平衡位置为原点物体的位移。

简谐振动还可以表示为：位移随时间按正弦（或余弦）规律变化的振动，记作

$$x = A \sin \omega t$$

式中  $A$  是振幅， $\omega$  为角频率， $t$  为时间。做简谐振动的物体的加速度为

$$a = -\frac{k}{m} x$$

加速度的大小也和物体相对平衡位置的位移大小成正比。在振动物体的最大位移处，物体的速度为零，加速度最大，在位移为零处加速度为零，速度最大。从功和能的角度观察简谐振动，因物体没有受到摩擦

或其它介质的阻力，所以只有动能和势能之间的相互转化，物体的机械能守恒。

例如，一个质量为 1 千克，摆长为 10 米的单摆在平衡位置的速度是 5 米/秒。当它摆到速度为 2 米/秒时，摆球的重力势能为

$$E_1 = E_2$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + E_p$$

$$E_p = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \times 1 \times (5^2 - 2^2)$$

$$E_p = 8 \text{ (焦)}$$

简谐振动又称“谐振动”，一切复杂的振动都可以看成是若干个不同的简谐振动的合成。

简谐振动是一种理想化模型。在忽略阻力的条件下，有许多振动现象可以看作是简谐振动。

**弹簧振子** 无摩擦的水平杆上穿有一个小球，小球与一只一端固定的轻质（质量可忽略不计）的弹簧水平穿过杆连接，构成了一个弹簧振子。小球受到的重力和杆的支持力相互平衡，对振子（小球）的振动没有影响。在弹性限度内振子离开平衡位置时受到的弹力为  $f = -kx$ 。这个弹簧的弹力的方向总跟振子偏离平衡位置的位移方向相反。在这个回复力的作用下，弹簧振子做简谐振动。

弹簧振子做简谐振动的周期为  $T = 2\sqrt{\frac{m}{k}}$ ，式中  $T$  表示周期，其

单位是秒， $m$  表示振子的质量，单位是千克， $k$  是轻质弹簧的倔强系数。如图(1)所示。

若竖直悬挂的轻质弹簧下端挂一质量为  $m$  的物体（视其为质点），弹簧的伸长为  $l$  时，物体静止于  $O$  点。把物体竖直向下拉一段距离  $x$  到达  $A$  点（弹簧的弹性形变范围之内），然后释放物体，物体在  $O$  点附近做往复运动。取  $O$  点为坐标原点并定竖直向下为  $x$  轴的正方向，则此时物体受到的合力为  $F = mg - k(x + l)$  由于  $mg = kl$ ， $F = -kx$  同样地，振动物体在  $B$  点（物体在竖直方向所能达到的最高点）受到的合力的大小为  $F = mg + k(-x - l) = -kx$ ， $F$  的方向与位移的方向相反。

可见竖直悬挂的弹簧振子，在弹性限度内，无论在何位置其所受到的合力都可记作

$$F = -kx$$

满足物体做简谐振动的条件。所以竖直方向上悬挂的弹簧振子做的是简谐振动。

**简谐振动的周期公式** 振动的物体完成一次全振动需要的时间叫周期。它表示物体振动的快慢程度。我们利用简谐振动与匀速圆周运动的联系可以推出简谐振动的周期公式。在图(1)中，质量为  $m$  的质点在半径为  $A$  的圆周上从  $M$  点出发做匀速圆周运动，其角速度为  $\omega$ ，则质点到达  $N$  点时在  $x$  轴上的射影为  $x = A\cos \omega t$ 。

可见匀速圆周运动的质点在  $x$  轴上的射影点  $Q$  是在平衡位置（圆心）

0 点附近作简谐振动。已知做匀速圆周运动质点的向心加速度为  $\omega^2 A$ ，其在 x 轴上的射影的加速度为

$$a = -\omega^2 A \cos \omega t = -\omega^2 x$$

方向指向平衡位置（圆心）。则根据牛顿第二定律

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{\omega^2}{m} x$$

于是有 
$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

对比匀速圆周运动，质点沿圆周每转一圈射影点完成一次全振动，则匀速圆周运动的周期恰好就是其射影的简谐振动的周期，则

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

是简谐振动的周期公式。式中  $m$  是反映了质点的固有属性——惯性的的大小的物理量， $k$  是系统自身特性的物理量。所以简谐振动的周期是由构成振动的自身条件所决定的，又被称做固有周期。故做简谐振动的物体具有等时性，常被用作计时的工具，其周期可作为计时的基准周期。

**单摆** 用一根不能伸长的而且质量可以忽略不计的细绳，一端拴着一个球，绳长远大于球的直径，绳的另一端固定在悬点上，这样的装置叫做单摆。如图所示。

使单摆的摆球在一竖直平面内，在平衡位置 0（单摆不振动时的静止位置）附近做振动。摆球受到的回复力为

$$F = mg \sin \theta$$

当摆角  $\theta < 5^\circ$  时， $\sin \theta \approx \theta = \frac{x}{l}$ ，回复力的大小

$$F = -\frac{mg}{l} x$$

再考虑到回复力的方向总与位移方向相反（以平衡位置 0 为原点），则有

$$F = -\frac{mg}{l} x, \text{ 令 } k = \frac{mg}{l}, \text{ 则 } F = -kx$$

所以当  $\theta < 5^\circ$  时，单摆作简谐振动。

将  $k$  代入简谐振动的周期公式  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ ，得到单摆的周期公式

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

从单摆的周期公式可知，在摆角很小的情况下，单摆的周期与振幅（摆球离开平衡位置的最大距离）、摆球的质量无关。

单摆的周期公式由荷兰学者惠更斯首先得到，并于 1657 年首先利用单摆的等时性发明了带摆的计时器。由于单摆的周期可以通过调节摆长来实现，计时很方便。例如，在北京造一个周期为 2 秒的秒摆的摆长为

$$l = \frac{T^2 g}{4\pi^2} \quad \text{北京的 } g = 9.8012 \text{ 米/秒}^2$$

$$l = \frac{2^2 \times 9.8012}{4 \times 3.1416} = 0.993 \text{ 米}$$

**回复力** 振动的物体受到使它回到平衡位置的力。回复力是物体产生振动的必要条件。做振动的物体在平衡位置受到的回复力为零，只要物体离开平衡位置，它就要受到回复力的作用，回复力的方向总是指向平衡位置。

回复力是以效果命名的，不是根据产生条件命名的，它既可能是一个力的分力，也可能是几个力的合力，还可能是几个力的合力在某一方向上的分力。例如单摆在摆动过程中摆球受到的回复力是重力的切向分力。又如图中所示的是一个放置在水平光滑桌面上的、左右被固定的橡皮筋拉紧的小球，使小球稍离平衡位置，则使小球振动的回复力是两根橡皮筋对小球弹力的合力。

简谐振动的物体受到的回复力的特点是：回复力的方向总是指向平衡位置，回复力的大小跟物体相对于平衡位置的位移成正比。  $F = -kx$

在弹性限度内，弹性力的大小，遵从胡克定律  $F = -kx$ ，方向总是和位移方向相反。物体在弹性力的作用下的振动是简谐振动。有些力不是弹性力，但其变化规律也和弹性力相似，叫做准弹性力。在准弹性力的作用下，物体受到的回复力也满足  $F = -kx$  的条件时，物体做简谐振动。例如，截面为  $S$  的圆柱体漂浮在水面上。用力将圆柱体按下微小的位移  $x$ ，松开手后圆柱体将在水面上下作简谐振动。

**振幅** 做机械振动的物体离开平衡位置的最大距离。它是描述机械振动往复范围的物理量，通常用符号  $A$  来表示。在国际单位制中振幅的单位是米。振幅的大小表示振动的强弱，振幅既无方向又无正负。振幅越大，振动的机械能越大，振幅表示振动物体的能量大小。例如，做简谐振动的物体总的机械能就可以表示为  $E = \frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$ 。可以说做简谐振动物体的能量被它的振幅大小决定，也就是被它的初始状态所决定。

当做振动的物体系统由于摩擦等原因能量减少的时候，其振幅要减小。做简谐振动的物体系统由于系统的能量没有损失，其振幅保持不变。

作简谐振动物体的振幅大小不影响简谐振动的周期（或频率）。

**周期** 振动物体完成一次全振动所经历的时间用符号  $T$  表示。周期的单位是秒，单位符号是  $s$ 。所谓全振动是指物体振动时从某一位置开始计时，物体第一次以相同的速度方向回到初始位置，叫做完成了一次全振动。

周期和频率互为倒数即  $T = \frac{1}{f}$ ，或  $f = \frac{1}{T}$ 。

周期与角频率的关系是  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ， $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。

**频率和角频率** 做振动的物体在单位时间内完成全振动的次数。通常用符号  $f$  或  $\nu$ （读作 [niu:]）表示，它是表示振动快慢的物理量。频率的单位是赫兹，符号是  $\text{Hz}$ 。1 赫兹 = 1 秒<sup>-1</sup>。常见的秒摆的频率是  $f = 0.5$

赫兹。角频率又称圆频率，用符号  $\omega$  表示，它是人们在研究质点做匀速圆周运动的射影的运动规律时，发现质点的射影做的是简谐振动，而且质点圆周运动的角频率是其射影的简谐振动的频率的  $2\pi$  倍，也就是在  $T$  秒内质点射影做的简谐振动的次数恰与质点的匀速圆周运动的角频率相对应，用公式表示为  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ 。这种方法叫参考圆

法。角频率的单位是弧度/秒，单位符号 rad/s。

**固有频率** 参见“频率和角频率”条。

**相位、相位差** 相位，又叫相、相角、位相或周相，它是用来表示振动的状态（或步调）的物理量。当振动物体的角频率和它的初始位置确定之后，该物体的相就被确定(1)了。物体振动一个周期，它的位相在  $0 \sim 2\pi$  范围内变化，位相的各不同的值表示了振动物体在一个周期内各不同时刻的运动状态，就是说物体的位相一定，其位移大小、方向，速度的大小、方向，加速度的大小、方向就都确定了。

例如，描述做简谐振动的物体位移、速度和加速度的方程式是  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$   $v = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$   $a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0)$

方程式中余（正）弦函数表示角度的那一部分  $(\omega t + \varphi_0)$  就是作简谐振动物体的相位， $\varphi_0$  叫做初相位（或初相）， $\omega$  为做简谐振动的角频率。从式中可知做简谐振动的物体的位移、速度、加速度，被振动物体的角频率、初相位、时间，即被相位所决定，进而我们还可以算出振子不同相位的动能和势能。

两个角频率相同的简谐振动相位之差  $(\omega t + \varphi_{02}) - (\omega t + \varphi_{01})$

$-(\omega t + \varphi_{01}) = \varphi_{02} - \varphi_{01} = \varphi_0$  表示了两个简谐振动的不一致到了什么样的程度。例如图(1)所示的两个简谐振动的相位差为  $\varphi = \pi/2$ 。就是当第一个做简谐振动的物体在平衡位置，速度最大，加速度为零时，第二个做简谐振动的物体已经到达最大位置处，且速度为零，加速度最大。

当两个角频率相同的简谐振动的相位差  $\varphi = 2n\pi$  时（ $n$ 为整数），两振动的步调一致，它们总是同时、同向运动，同时达到同一侧位移最大处，同时同方向地经过平衡位置。也就是说它们是同相位。如图(2)所示。

当两个角频率相同的简谐振动的相位差  $\varphi = (2n + 1)\pi$  时（ $n$ 为整数），表示两个简谐振动的步调相反。它们的振动方向总相反，速度方向也总是相反，同时到达异侧的位移最大值处，同时经过平衡位置但速度方向相反。也就是他们是反相位。如图(3)所示。

双线摆图所示为双线摆，悬点在同一水平面上，悬线等长，下面共同悬挂一个摆球。双线摆的优点是保证摆球始终在同一竖直面内摆动。双线摆摆球到两悬点连线的垂线长为双线摆的实际摆长。在摆线平面与竖直面偏角小于  $5^\circ$  时，双线摆的振动是简谐振动，双线摆的同期为

$$T = 2 \sqrt{\frac{l \cdot \cos \theta}{g}}$$

双线摆相当于一个摆长为  $l \cos \theta$  的单摆。

例如双线摆摆线长 1 米，摆线与竖直方向的夹角为  $30^\circ$ ，则该双线

$$\text{摆的周期是 } T = 2 \sqrt{\frac{l \cdot \cos 30^\circ}{g}} T = 1.8 \text{ 秒。}$$

**简谐振动的位移时间图象** 简谐振动的位移公式为  $x = A \cos(t + \varphi_0)$ ，我们可以在直角坐标系中作出描述作简谐振动的振子的位移随时间变化的函数关系图象。如图所示。图中坐标轴横轴表示平衡位置，横轴的长度表示时间。振动图线上某点在纵轴上的射影是振子相对平衡位置的位移。

简谐振动的位移-时间图象记录了某振子在一段时间内全部振动的过程中每一时刻所对应的位移。反映出在振动过程中速度、加速度的变化规律，使我们对简谐振动的运动规律有一个定性的了解。

应用简谐振动的位移-时间图象可以从已知的时刻判断振子的位移的大小和方向、速度的方向以及加速度的方向。

例如：在图中，弹簧振子的振动周期是 2 秒，振幅是 5 厘米，角频率为  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  弧度/秒。在 1.0 秒末该振子位移是 5 厘米。具体的判

断方法是从  $t = 1$  秒处作  $t$  轴的垂线，交位移-时间图线于 C 点，过 C 点作  $t$  轴的平行线，交于纵轴一点，该点坐标即为我们要求的位移大小和方向，振子的位移为 +5 厘米。又如求振子到达位移是 +2.5 厘米的时刻的方法是先过纵轴 +2.5 厘米点作时间轴的平行线，交振动图线于 A、B 两点。A、B 两点所对应的时刻即为振子到达 +2.5 厘米的时刻。

我们可以从图线的切线的斜率判断振子的速度方向。在 A 点图线的斜率为正，则振子在该时刻的速度方向与我们规定的正方向相同。反之，在 B 点图线切线的斜率为负，振子此时刻的速度方向与我们规定的正方向相反。进一步可以知道振子在 C、D 两点的速度为零。E、F 点的速度最大。

我们还可以根据  $a = \frac{-kx}{m}$ ，判断振子在某一时刻的速度的大小和方向， $t_1$ 、 $t_2$  时刻振子的加速度都是指向平衡位置。再根据振子的速度方向可知， $t_1$  时刻振子做减速运动， $t_2$  时刻振子做加速运动。

**简谐振动的描述** 实验证明做匀速圆周运动的质点在  $x$  轴上的射影的运动与做简谐振动的振子具有相同的运动规律。在初等数学阶段，我们常用质点的匀速圆周运动来描述简谐振动，这个圆叫参考圆。通过参考圆，我们把匀速圆周运动和简谐振动联系起来，并用匀速圆周运动的概念、规律研究简谐振动。

如图所示，质点  $m$  以  $A$  为半径（ $A$  又被称为旋转矢量），做逆时针方向的匀速圆周运动，其角速度为  $\omega$ ，速度为  $v_m$ 。在开始时刻质点  $m$  通过与  $x$  方向成  $\varphi_0$  角的位置。经过  $t$  秒钟，从 B 转动到 C。质点在  $x$  轴上射影的位移为  $x = A \cos(t + \varphi_0)$  即为简谐振动的位移公式。

同样的,  $v = v_x = -v_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$ , 其中  $v_m = A\omega$ 。这是简谐振动的速度公式。

简谐振动的加速度公式

$$a = -a_m \cos(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0), \text{ 其中 } a_m = \omega^2 A$$

简谐振动的动力学规律可根据牛顿第二定律  $F = ma$  来推导, 因为  $a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi_0)$ , 所以做简谐振动物体受到的回复力为

$$F = -m\omega^2 [A \cos(\omega t + \varphi_0)] \text{ 令 } k = -m\omega^2 \text{ 则}$$

$$F = -kx$$

由于做匀速圆周运动的周期  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  将  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  代入周期公式便可得到简谐振动的周期公式

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

例如, 图中的弹簧振子的倔强系数为  $k = 100$  牛/米, 振子的质量是 1 千克。在弹性限度内把振子拉到 1 米处释放。从图中对比参考圆可知该振子的初相位  $\varphi_0 = 0$ , 振幅  $A = 1$  米, 其周期  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2 \times 3.14$

$$\times \sqrt{\frac{1}{100}} = 0.628 \text{ 秒, 角频率 } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 10 \text{ 弧度/秒, 最大加速度 } a_m = \omega^2$$

$A = 100 \times 1 = 100$  米/每秒<sup>2</sup>。若振子从 P 点出发第一次到达 a 点时其位移为  $Oa = x = \frac{1}{2}A$ , 则所经历的时间为

$$t \frac{\arccos(\frac{x}{A})}{\omega} = \frac{\arccos(\frac{1}{2})}{10} = \frac{\pi}{30} \text{ 秒}$$

$$t = 0.1 \text{ 秒}$$

此时振子的速度大小为  $v = A\omega \sin(\omega t + \varphi_0)$

$$= 10 \times 1 \times \sin(10 \times \frac{\pi}{30} + 0) = 8.66 \text{ 米/秒, 速度方向指向平衡位置。}$$

振子此时受到的回复力为  $F = -kx = -m\omega^2 x = -100 \times 1 \times 0.5 = -50$  牛顿。负号表示方向指向平衡位置。

**简谐振动的能量** 做简谐振动的物体对外界无能量交换, 总能量守恒。以弹簧振子为例:

$$\begin{aligned} \text{在某时刻其动能: } E_K &= \frac{1}{2}mv^2 \\ &= \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

总能量为:  $E_{\text{总}} = E_P + E_K$

$$= \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 [\sin^2(\omega t + \varphi) + \cos^2(\omega t + \varphi)]$$

$$= \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

$$= \frac{1}{2} k A^2$$

从  $E_{\text{总}} = \frac{1}{2} k A^2$  来看，对一定的振动系统（即  $k$  一定），简谐振动的能量由振幅（ $A$ ）来决定。而振幅是由振动的初始位置决定的。从公式可以看出，对不同的振动系统，由于  $k$  值不同，其振动频率不同（ $k = m \omega^2$ ），简谐振动的能量也不同。所以，简谐振动的总能量由振幅和频率决定。

也就是由外界所提供的能量来决定。当相位角  $\varphi = (\omega t + \varphi_0) = (2k+1)\frac{\pi}{2}$  时，（ $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ），振动物体正通过平衡位置，这时  $\sin\varphi = 1$ ， $\cos\varphi = 0$ ，这时  $E_K = \frac{1}{2} k A^2$ ， $E_P = 0$ 。当  $\varphi = k\pi$  时（ $k = 0, 1, 2, \dots$ ）振动物体通过最大位移处，这时  $\sin\varphi = 0$ ， $\cos\varphi = 1$ ，得出这时  $E_K = 0$ ， $E_P = \frac{1}{2} k A^2$ 。在其它任何位置物体同时具有动能和势能，动能和势能在不断地相互转化，动能与势能的总和保持不变。

$$E_{Kx} + E_{Px} = E_{Pm} + E_{Km} = E_{\text{总}}$$

**阻尼振动** 振幅随时间减小的振动称为阻尼振动。因为振幅与振动的能量有关，阻尼振动也就是能量不断减少的振动。阻尼振动是非简谐振动。

能量减少的方式有两种。一种是由于摩擦阻力的作用使振动系统的能量逐渐转化为热运动的能量。例如单摆摆动的过程中振幅减小或停下来就是由于系统的阻力作用使摆的机械能转化为空气的内能。另一种是振动系统引起周围物质的振动，使能量以波的形式向四周发出。例如：琴弦发出声音不仅因为有空气的阻力要消耗能量，同时也因为以波的形式辐射而减少能量。最后琴弦会停止振动。

机械振动按振幅的变化可分为阻尼振动（减幅振动）和无阻尼振动（等幅振动）。

物体做无阻尼振动仅指其振幅大小不变，物体做简谐振动时，只受回复力的作用，不受任何阻力，不对外做功，系统没有能量输出、输入，总能量守恒，振幅保持不变，这是一种无阻尼的自由振动。另外一种受迫等幅振动。物体在振动的过程中有能量的输出（损耗），系统又从外界输入了能量，正好补偿了在振动过程中所输出（损耗）的能量。这种振动系统的能量和振幅都保持不变。

**自由振动，受迫振动** 做振动的系统在外力的作用下物体离开平衡位置以后就能自行按其固有频率振动，而不再需要外力的作用，这种不在外力的作用下的振动称为自由振动。理想情况下的自由振动叫无阻尼自由振动。自由振动时的周期叫固有周期，自由振动时的频率叫固有频率。它们由振动系统自身条件所决定，与振幅无关。

受迫振动也称强迫振动。在外来周期性力的持续作用下，振动系统发生的振动称为受迫振动。这个“外来的周期性力”叫策动力（或强迫力）。

物体的受迫振动达到稳定状态时，其振动的频率与策动力频率相同，而与物体的固有频率无关。

例如：扬声器纸盆的振动，录音机耳机中膜片的振动都受到外来策动力的持续作用，振动频率都与策动力的频率有关与其自身的固有频率无关。

物体作受迫振动的振幅保持不变，它的大小不仅和策动力的大小，还与策动力的频率以及做振动的物体自身的固有频率有关。做受迫振动的物体一边克服阻力做功，输出能量，一边从策动力的做功中输入能量。当从策动力输入系统的能量等于物体克服阻力做功输出的能量时，系统的能量达到动态平衡，总量保持不变，振幅保持不变，做等幅振动。

**共振** 当策动力的频率（或角频率，周期）与物体的固有频率（或固有角频率，固有周期）很接近或相等时，受迫振动的振幅急剧增大的现象。

共振是受迫振动的特例。

只有在策动力的方向和物体运动方向相同才能使物体加速度增大，引起做受迫振动物体的动能增大，进而使受迫振动的振幅增大。当策动力的频率变到与固有频率越接近，使做受迫振动物体振幅增大的可能就越多，当策动力的频率与做受迫振动物体的固有频率相同时，策动力的每次作用都使物体的振幅增大直到最大值。

一般的受迫振动中，由于策动力与物体的固有频率不同，在一个全振动过程中策动力的方向有时和物体运动的方向一致，有时相反。当方向相同时，策动力做正功，系统输入能量，系统能量增加；当方向相反时，物体克服策动力做功，物体输出能量，系统能量减少，只有当策动力的频率与受迫振动的物体的固有频率相同且振动步调也相同，即“合拍”的情况下，才能保证策动力始终做正功。系统的能量不断增加，直到策动力做功供给系统的能量等于克服各种阻力所消耗的能量时，振幅不再增大，达到最大振幅。

共振现象具有两重性。我们既要利用共振现象为人类造福，又要防止共振给工农业生产，人民生活带来危害。

声学中乐器的共鸣箱，无线电中的电谐振等就是使系统固有频率与策动力的频率相同，发生共振。建桥时使管柱沉入江底，就是利用共振的方法使管柱振幅达到最大，克服泥沙的阻力，下沉到江底的。防止共振的方法是改变物体的固有频率，使之与策动力的频率相差越大越好。

例如：播音室对隔音要求很高，常用加厚地板、墙壁的办法，使它的固有频率和声音的频率相差很多，从而使声音的振动不会引起墙壁和地板的共振。又如电动机要安装在水泥浇注的地基上，与大地牢牢相连。或要安装在很重的底盘上，为的是使基础部分的固有频率增加，以增大与电机的振动频率（策动力频率）之差来防止基础的振动。

还可以从控制策动力的频率大小来防止共振。如造电动机、风扇时，都尽量使之质量分布均匀，尽量使其重心落在轴心上，以减小共振带来的危害。

**机械波** 机械运动的多种形式之一。它是机械振动在媒质中的传播。当弹性媒质中的一部分发生振动，由于各部分媒质间的相互作用，带动了各部分媒质做振动。产生机械波的条件：一是要有振源，二是要有传播机械振动的弹性媒质。在机械波传播过程中，靠近波源的媒质都迫使后面媒质做受迫运动。所以，机械波是振动的运动形式和能量的传播。媒质中各质点都在自己的平衡位置附近做振动，并不随波前进。可以认为媒质中的各个质点是以弹性力互相联系着的。设有一个质点离开平衡位置振动（即为振源），周围质点要对这个质点产生弹性作用，使之回到平衡位置；同时，周围质点受到这个质点弹力的作用，也纷纷离开平衡位置，随之振动起来。后振动的质点振动情况要重复先振动起来的质点的振动情况，也就是后振动质点的频率或周期与先振动的频率或周期相同。但是由于振动的传播需要时间，后振动的质点在时间上、位相上落后于先振动的质点。只要振源不断的振动，那么振源的振动引起其它质点的振动将会不断地继续和延展开去，把能量以振动的形式按一定的速度由近及远向各个方向传递，形成了机械波。

例如：电话膜片在空气中做振动时，使周围空气振动，由于空气的压缩，稀疏产生了弹性力引起周围部分的空气振动。这样，压缩和稀疏相随将膜片的振动向各个方向传播出去。电话膜片是波源，空气是波的媒质。

在媒质中，波源做简谐振动所形成的波叫简谐波，或者说简谐振动的传播所构成的波是简谐波。它是最简单的、最基本的波，由于一切的复杂振动都可以看成是由不同简谐振动合成的，因此，一切复杂的波都可以看成是简谐波的合成。

中学教材中提到的波就是指简谐波。

**横波和纵波** 振动传播时有两个运动方向。一个是振动的传播方向，另一个是媒质的振动方向。当媒质的振动方向和振动的传播方向垂直时，这种波叫横波。横波是最简单的波之一。

机械横波只能发生在固体之中。

当媒质的振动方向与振动的传播方向在同一条直线上时，这种波叫纵波。空气中声波是纵波。向河水中投入一块石头，可以看到水面有波传播，这种水面波既不是横波，也不是纵波。水面波是因重力以及表面张力的作用在水表面传播的波。在水面波传播的过程中，水的质点运动比较复杂，一般是沿椭圆轨道做周期性的运动。

**波长** 振动在一个周期中传播的距离。通常用符号  $\lambda$  表示。因为相隔同一周期的质点的振动状态完全相同，所以相隔一个波长的整数倍各点的振动是相同的，振动的相位相同，故波长就是任意两个相邻的振动同相位的点之间的距离，还可以说是相差为  $2\pi$  的质点间的距离。纵波情况下，波长是两相邻密集或相邻稀疏的中心间的距离。横波情况下，就是两相邻波峰或波谷之间的距离。波长描述了波在空间上的周期性。

同一列波在不同的媒质中传播时，由于振源的频率不变，波的频率也不变，波速变化则波长也跟着变化。波速 振动在媒质中传播的速率，即单位时间内振动传播的距离。用符号  $v$  表示，国际单位制单位是米/秒。

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} \lambda \cdot f$$

波速等于波长与周期之比；等于波长与振源（即媒质中各质点的）的频率的乘积。频率  $f$  表示波在时间上的周期性。由于波的频率被振源的频率决定，所以，同一列波在不同的媒质中的传播的频率不变，波速的大小由媒质自身的性质所决定。各种频率的机械波在一定的媒质中传播时，都具有相同的速度。因此频率不同的机械波在同一媒质中传播时波长不同；同频率的机械波在不同的媒质中传播时，由于波速不同，波长也就不同。波长与波速成正比，和波的频率成反比。

例如，0 时声波在空气中的传播速度为 332 米 / 秒，一列波，其波源的振动频率为  $5 \times 10^3 \text{Hz}$ ，则它在空气中的波长为： $\lambda = v_1 / f = 332 / 5 \times 10^3 = 0.664$  米。声波在玻璃中的波速为 5500 米 / 秒，则该频率的波在玻璃中的波长为  $\lambda = v_2 / f = 5500 / 5 \times 10^3 = 1.1$  米。

**波的图象** 即简谐波的图象。表示一列波在媒质中传播的过程中，某一时刻，媒质中各个质点的位置分布情况。即该时刻各质点离开平衡位置的位移分布情况图象。

如图(1)所示，横轴上各点坐标表示在波的传播方向上各质点的平衡位置。纵轴坐标表示的是偏离平衡位置的位移大小，纵轴正负表示的是偏离平衡位置的位移方向，图象中两个相邻的相位相同的点之间的距离为波长。在波的图线中凡距离为波长的整数倍( $n$ )的点，在任何时刻对于平衡位置具有相同的位移，具有相同的速度，只是它们沿传播方向上落后  $n$  个周期。图线是波传播的某一时刻各个质点的位置，也是整个波的形态。所以也叫波形图。简谐波的形状是正弦或余弦曲线。凡距离为半个波长的奇数倍的两点，在任意时刻的位移大小，速度大小相同，但方向相反。在下一时刻  $t + \Delta t$ ，各点位移发生变化如图(2)中虚线所示，波形向前传播。波形向前传播的速度即为波的速度。利用波的图象可以从中直接了解波长，质点的振幅，如果再加上传播方向，可求波另一时刻的图象。媒质中某质点振动图象和某时刻的波动图象相结合，可以求出波速和波的方向。

例如，如图(2)所示是一列波某时刻的波形图象及波的传播方向。经过 4.5 秒后，这列波正好第四次重复出现这样的波形图（实线所示）。这说明在此期间各质点完成了三次全振动  $n = 3$ ，所以周期  $T = 4.5 / 3 = 1.5$  秒，波的频率是  $f = 1 / T = 0.67$  赫兹。从图象可知两个相邻的位相相同的点间的距离是 40 厘米，即波长  $\lambda = 0.4$  米。由波速公式可算出波速， $v = \lambda \cdot f = 0.267$  米 / 秒。若再过  $T / 4$ ，则波形图将沿波的传播方向移动  $\lambda / 4$ ，图中虚线所示  $T / 4$  后的波形图。

若此波的传播方向是  $v$ ，方向正好与上种情况相反，经过  $t = 1.25$  秒（ $t < T$ ）波形图成为虚线所示图象，则该波的波速为  $v' = \frac{s}{t}$ ，从图线可知两时刻的波峰间距恰为  $3/4 \lambda = 30$  厘米， $v = 30 / 1.25 = 26.67$  厘米 / 秒。如果  $t > T$  就要考虑波的重复性， $t = nT + \frac{3}{4}T$ ，式

中的 $n$ 为在  $t$  时间间隔内，机械波的整周期数。则有  $T = \frac{t}{(n+0.75)}$ 。

$$v' = \frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda(n+0.75)}{t} = 0.36(n+0.75) \text{ 米 / 秒。}$$

**波的传播方向与质点振动方向的关系** 机械波的传播中，波源带动其周围的质点振动，即波源周围的质点做受迫振动。所以，机械波的传播过程中，后振动的质点总是要重复先振动质点的振动。人们看到波在向前传播，也就是振动这种形式向前进了。图(1)中所示，一列横波 A 点的振动方向怎样判断呢？由于该列波的传播方向是从左向右的，所以质点 A 的振动要滞后于它左边的任意一点 A' 点，A' 点的位移是 A 点下一时刻要达到的位移。因此可以判断 A 点的运动方向应向 y 轴正方向。如果此波的传播方向是向左，则 A 点的右方 A'' 点是 A 点下一时刻的位移到达的位置，即 A 点要重复 A'' 点的运动。就是说 A 点要跟着 A'' 运动，由此可判断在 v 向左的情况下，A 点向 y 轴负方向振动。

又如图(2)中所示，B 点向上振动，波向什么方向传播？从波传播过程中质点总是要重复靠近振源质点的振动，从图中可知 B 点下一时刻要到达的位移一定是 B 右方的点。由此可知，比 B 先振动的点在右方，振动这种形式是从 B 的右方向传到 B 点的，再由 B 点继续向左传播。

**波的传播** 波在同一媒质中传播时，波沿直线前进。波在从一种媒质传到另一种媒质时要发生反射和折射。波在传播过程中遇到障碍物要发生绕过障碍物而传播的衍射现象。几个波源产生的波在同一媒质中传播时，无论相遇与否，都保持它们各自的频率、波长、振动的方向，并按照各自的原来传播方向继续前进，不受其它波的影响（运动的独立性原理）。在两列波相遇处，媒质质点同时参加两个波的振动。在波相遇处质点的位移是各列波单独存在时在该点所引起振动位移的矢量和，也就是说质点的振动是这些振动的合振动。特别是当两列频率相同、振动方向相同、有固定相差的波相遇时，会出现特殊的波的干涉现象。

波的衍射和干涉现象是波所特有的性质。有无干涉和衍射是判断波动的重要判据。

**波的叠加** 大量的事实证明，从几个波源产生的波在同一媒质中传播时，无论它们是否相遇，每个波都按照自己的传播方向前进，每个波都独立地保持自己原有的特性。相遇处质点的位移是各波独立地通过时在该点所引起位移的矢量和，这就是波的叠加原理。

例如，两列波在一根绳子上传播，一列波向右传播，另一列波向左传播，彼此接近。图(1)中的一系列示意图说明两列波互相穿过而没有被改变的过程。两列波重叠的过程中绳子各点的位移正好是这两列波分别引起的位移的和。如果向右传播的波的振幅是 0.8 厘米，向左传播的波的振幅是 0.4 厘米，两列波都通过的是那点的振幅是 1.2 厘米。还有一种可能是图(2)所示的情况。两列波相遇时位移方向相反，其位移的矢量和趋向于相互抵消。

媒质中无论有多少单独的波，叠加原理都是适用的。每列波都有它自身的独立作用。总的作用结果是所有单个作用的矢量和。

若将叠加原理反过来用，我们可以把一个复杂的波看成是一组简单的波的合成。任意周期性的振动，不管它多么复杂都被分解为较简单的

简谐振动之和。电子合成器模仿乐器发出的声音就是将各种简单的振动，按适当比例合成的。

**波的干涉** 波的干涉是波的特性之一。频率相同，振动方向相同，相位差恒定的两列波叫相干波。相干波在传播过程中，在空间相遇。在重叠处两列简谐波所引起的质点的简谐振动具有相同的频率，相同的振动方向。由于各点的相位不同，振幅也不尽相同。可以表明合振动的振幅为  $2A_0 \cos \frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$ 。如图(1)所示。

当： $|r_2 - r_1| = k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ )

这时余弦值的绝对值为 1，所以合振动的振幅达到最大值为  $2A_0$ ，这两列波达到 P 点时，它们正好是同相。

当： $|r_2 - r_1| = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ )

此时余弦值为零，所以合振动的振幅达到最小值为零，这两列波达到 P 点时，它们正好是反相。由此可知，当两列相干波的波程差  $r_2 - r_1$  为波长 ( ) 的整数倍时，振幅达到最大值  $2A_0$ ，当波程差  $r_2 - r_1$  为半波长的奇数倍时，振幅为零。也就是说各点的振幅大小不随时间而变化，但因空间位置不同而不同。由此可见，在两相干波的相遇区内，就出现有的地方振动增强，有的地方振动减弱。并且振动加强和振动减弱的区域彼此互相间隔，这种现象叫波的干涉。振动最强处 (即振幅为  $2A_0$  处) 叫干涉相长。振动最弱处 (即振幅为 0) 叫干涉相消。总之，干涉现象是两列同频率、同振动方向、而且相位差恒定的波相叠加而产生的。其合振动的振幅不随时间改变，只是在空间位置上周期性变化的分布。

**干涉图样**：在波的干涉现象中，振动加强的区域和振动减弱的区域相间构成的一个稳定图样叫做干涉图样。如图(2)所示。图(3)是水波的干涉图样照片。

**波的衍射** 波的衍射现象是波的特性之一。

波在经过障碍物时，传播方向变化，发生绕过障碍物继续向前传播的现象叫波的衍射现象。波的衍射现象并不是总能观察到，只有障碍物 (线小孔) 的尺寸与波长相差不大时才会发生明显的衍射现象。

**声源** 各种振动着的物体都可以向周围的媒质发出弹性波，都是声源。

常见的声源如杆，弦，气柱，膜，板的振动。

音乐贺卡中的发声元件是由压电陶瓷片制成的。压电陶瓷片 (钛酸钡陶瓷) 的振动是杆类声源的代表。胡琴、琵琶、提琴、吉它等属于弦类声源。它们都是由张紧的弦形成振动，再使与弦固定在一起的木盆作受迫振动而发出乐音。一切管乐器如管风琴、笙、笛子等都是使管中的气体振动发出乐音，锣、鼓等乐器则是靠膜、板的振动而发出乐音的。

**声波** 机械波之一。各种振动着的物体都是声源。声源的振动迫使跟它毗连的空气层以同样的周期  $T$  振动起来。由于空气受到压缩或稀疏时，有弹性力的作用产生，就进而引起附近部分的空气的振动。这样，声源的振动就由于空气媒质的压缩和稀疏以声速向各个方向传播出去。

在气体或液体中波是纵波，在固体中声波可以是纵波也可以是横

波。

声波不是声音，声波进耳后，迫使耳膜的振动，大脑的听觉神经引起的听觉才是声音。

频率范围在 20 ~ 20000 赫能使人产生听觉，故命名为声波。从物理学来看频率在 20 ~ 20000 赫以外的振动与这个频率以内的振动没有本质的区别。因此，物理学中把  $10^{-4}$  ~ 20 赫的在液、固体中传播的弹性振动叫次声波。例如：地震波，海洋中的海啸，都是次声波。频率高于 20000 赫且低于  $5 \times 10^8$  赫的弹性振动叫超声波。蝙蝠发出的就是超声波。 $5 \times 10^8$  ~  $10^{12}$  赫的声波是特超声波。声波在媒质中的传播速度叫声速。不同的媒质中声速不同。声速与媒质的温度、分子量有关。0 时空气中的声速为 332 米/秒，氢气中的声速 1263 米/秒，水中 1450 米/秒，钢棒中为 5050 米/秒。

**声波的反射** 机械波在遇到障碍时会发生反射和衍射现象。

声波在传播过程中遇到障碍物也会发生反射和衍射现象。

当障碍物的尺寸比声波的波长大得多的情况下，衍射现象不显著，声波的反射现象才会突出地显示出来。

回声是声波反射的例子，人耳听到回声的条件是：第一要有声波的反射。第二从障碍反射回来的声波比发出的声波至少要滞后 0.1 秒以上的时间间隔。

利用超声波的定向发射性质，可以探测水中物体，如探测鱼群，潜艇等。也可以用它来测量海深。如图所示，在船上装置一个发射与接收超声波的仪器，垂直地向海底发射超声波，再接收来自海底的反射波，用电子学方法准确地测出来回所用时间，由声波在水中传播速度就可算出海的深度。用这种方法可测几千米的海底深度。超声波在军事上更有着十分重要的用途。由于海水的导电性良好，电磁波在海水中的吸收作用非常严重，电磁雷达无法使用。利用“声波雷达”（称为声纳）所发射的超声波在船体上的反射，可以探测出敌潜艇的方位与距离。

**声波的干涉和衍射** 声波是机械波，两列满足相干条件的声波在空中相遇，在它们相遇空间的不同区域就会出现振动的加强区和减弱区，人们就会听到声音的忽强忽弱的变化。

在一个量筒中放适量的水，使筒中的空气柱长度等于音叉的波长的  $1/4$ 。用橡皮锤敲击音叉，将正在发音的音叉放在量筒的口上，然后缓慢地转动音叉，仔细的聆听就会听出有强弱的变化。这是由于音叉发出的声波被量筒中的水面反射回来，又与音叉发出的声波在空间相遇。若两列声波叠加使空气振动加强就听到较强的声音。两列声波叠加使空气的振动减弱则听到较弱，甚至听不到声音。声音强弱的变化是声波干涉造成的。

声波的波长范围是  $1.7 \times 10^{-2}$  ~ 17 米，与周围的一般障碍物的线度相差尺寸可以相比拟。所以声波能绕过一般障碍物，使人们能“未见其人，先闻其声”。

声波衍射实例比比皆是，用书遮住嘴发声，别人依然能听到声音。门开了小缝，声音就从屋内传到屋外，也是声波的衍射

**声波的共鸣** 声波的共振现象。许多乐器都利用声源和空气柱的共鸣来增强乐器的发声。

我国古代劳动人民利用共鸣来满足特殊的要求。例如：古代的琴发音低微，人们就利用声的共鸣将琴声扩大，他们专门盖起琴室，埋设类似共鸣腔作用的瓷瓮，来加强音响效果。如图中所示共振腔又叫做共鸣器。它是一种空腔，在声波的作用下，可以发生共振，使声音加强或消耗掉。有的古代建筑为了隔音用陶瓮口朝里砌成墙，每个瓮都起隔音作用。我国古代这种隔音技术正是利用了共鸣消耗声能的特性。可称为现代消声技术的先导。乐音人感觉好听，悦耳的声音。

**乐音** 由做周期性振动的声源发出的。它的波形为周期性变化的曲线。

乐音具有音调、音品、响度三个特性。

**音调** 音调是听觉分辨声音高低的一种属性。根据音调可以把声音按高低排列成音阶，它反映了人耳对声音频率的感受，低频率的声音音调低，高频率的声音音调高。但是音调与频率不成正比，它还与声强和波形有关。

音调的单位是：美 (mel)

例如：男低音最低的音调低到  $E_2$  音阶，它的频率是 82 赫，男高音能唱到  $C_5$  音阶，频率为 523 赫兹，女低音最低音调的音阶为  $G_3$ ，196 赫兹，女高音的最高音调可达到  $C_6$  音阶，其频率为 1047 赫。

**声强** 声传播时也伴随着能量的传播。用单位时间内通过垂直于声波传播方向的单位面积的能量（声波的能量流密度）表示。声强的单位是瓦/米<sup>2</sup>。声强的大小与声速成正比，与声波的频率的平方、振幅的平方成正比。超声波的声强大是因为其频率很高，炸弹爆炸的声强大是因为振幅大。

声强变化范围非常大，数量级有时会相差很多，因此改用对数标度。规定强度  $I=10^{-6}$  瓦/厘米<sup>2</sup>（相当于  $10^8$  赫兹时，能够引起听觉的最弱的声强）为测定声强的标准，引入声强级： $L=\log(I/I_0)$  作为声强级的量度。声强级的单位是贝尔，由于贝尔太大，通常用分贝（ $\frac{1}{10}$  贝尔）作单位； $L=10\log(I/I_0)$  分贝。

**响度** 指感觉到的声音的强弱，即听觉判断声音强弱的属性。根据它可以把声音排成由轻到响的序列。人耳感觉的响度客观上取决于声音的强度。声强相同的声音在  $1\sim 4\times 10^3$ Hz 的范围内听起来最响。在此范围之外，随着频率的降低或升高，响度感觉越来越弱，直到频率降低到 20Hz 或升高到 20000Hz，人耳便听不到这些频段的声音了。

**音色（音品）** 人们在主观感觉上借以区别同样响度和音调的两个声音的特性。它是一种复杂的感觉，主要决定于声音的波形，但也同响度和音调有关。乐器等发出的声音不是只有一个频率的单纯音，而是由频率最低的基音和基音整倍数的泛音组成复杂的波形曲线。基音相同的两个乐音给人的感觉不同是由泛音的多少，泛音的频率，以及泛音振幅的不同，传入耳中声音的波形不同，使得同样的音调有不同音品。

泛音太少声音听起来单调，泛音越多越好听，基音的高倍数泛音多，声音给人的感觉活泼明快；低倍泛音多，声音给人深沉浑厚的感觉。

现代乐器电子合成器（电子琴）就是分析了各种乐器的声谱，将复

杂的波形分成基音和频率不同振幅不同的泛音，用电子的手段发出同样的基音和振幅不同的泛音，就模仿了该乐器的声音，甚至合成一种各种乐器都达不到的音色，人们称之为太空音乐。

**噪声** 噪声有两种意义：(1)物理上指不规则的，间歇的，随机的声振动。(2)指任何难听的，不谐和的声或干扰。

噪声听起来有嘈杂、刺耳的感觉。

噪声是环境污染的三个来源之一，危害极大。轻则影响工作妨碍学习，重的造成耳朵和心血管多种疾病，更强的噪声使人头昏，影响婴儿的发育和导致动物的死亡。

噪声来源主要是交通工具、工业设备。

噪声污染的控制可采用：控制声源，控制噪声的传播和个人防护三种办法。

个人防护噪声的措施有带耳塞、耳罩、防噪声头盔等。

**超声波及其应用** 声波的范围大于  $2 \times 10^4 \text{Hz}$  的声波叫超声波。高频的超声波方向性好，因为波长短，衍射不明显，超声波能定向传播。超声波的穿透本领大，在液体、固体中传播时，衰减很小。在不透明的固体中，超声波能穿透几十米的厚度。超声波碰到杂质或媒质分界面有显著的反射。

超声波应用很广泛。利用超声波的机械作用可进行超声焊接、钻孔、除尘。利用超声的空化作用用来使油水混合物乳化，使一些在常温常压下不能发生的化学反应得以进行。利用超声的方向性好可进行超声探测定位。利用超声的穿透和反射性能进行固体的超声探伤，研究物质的内部结构。还可以利用超声波的生物作用，进行种子处理使农业增产，也可以进行超声治疗一些人类的疾病。

超声波的研究已经成为声学研究中一个重要的分支。

**测量误差** 物理实验不仅要定性地观察各种物理现象，更重要的是找出各物理量之间的数量关系。为此就需要进行测量。测量就是将被测的物理量与一个选作标准的同类量进行比较，得出它们的倍数关系。选为标准的同类量称之为单位。倍数称为测量的数值。由此可知一个物理量的测定值等于测量数值与单位的乘积。

测量要有统一的标准。我国 1984 年国务院颁布了《关于在我国统一实行法定单位计量单位的命令》。我国的法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础制定的。

测量可分为两类：1. 直接测量，例如：天平称质量，尺测长度，安培表测电流。2. 间接测量：根据直接测量的量按一定的公式通过计算得出结果。如用单摆周期公式  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  求  $g$ ，直接测量出该地的某单摆

摆长  $l$ 、周期了代入公式  $g = \frac{4\pi^2}{T^2} l$ ，计算出该地的重力加速度。物理量

客观上有确定的值叫真值。实际测量结果很难与真值完全相同，他们之间的差叫误差。

误差又分：

1. 系统误差：主要是由于测量仪器不完善，实验理论和实验方法不完善造成的。系统误差的特点：误差朝着一个方向偏，测量结果或者偏

大，或者偏小。减小系统误差的办法是提高仪器的精度，改进实验方法，在计算中根据偏差引入修正项。

2. 偶然误差：来源于人的感觉能力的限制，实验环境中偶然因素的干扰等。偶然误差的特点是大小无定值。测量值与真实值相差时大时小；多次测量求出的平均值较为接近真实值。

误差的估算有两种办法：

绝对误差： $\Delta x = x - x_0$ ，式中  $\Delta x$  是绝对误差， $x$  是测量误差， $x_0$  是真实值（有时可用多次测量求出的平均值来代替真实值）。

相对误差： $\frac{\Delta x}{x} \times 100\%$

**有效数字** 一切直接测量数据都应包括可靠数字和一位估计数字，总起来称做有效数字。在测量中，从最左面一位非零数字起，到有误差的那位估计数字止的所有各位数字为有效数字。如测得一长度为 0.1250 米，其中 1、2、5、0 是四位有效数字。又如，测得一电压为 0.0063 伏，只有 6、3 两位有效数字。

如果改用精度较高的仪器，可以增加有效数字的位数。如图(1)(2)测量同一木块长度，用精度不同的刻度尺记录数据分别为 3.7 厘米、3.75 厘米。

有效数字不因单位换算而增减，如：0.0063 伏 = 6.3 毫伏 =  $6.3 \times 10^{-3}$  伏，其有效数字仍为 6、3 两位。又如，一个记录数字为  $13.5 \times 10^5$  欧，用千欧为单位，应记做  $13.5 \times 10^2$  千欧，不能记做 1350 千欧。

有效数字的运算遵从两个基本原则：1. 估计数字与

别的数字相加减、相乘除，所得的数字也是估计数字。2. 计算的最后结果只能保留一位估计数字。进行加、减运算时，由左向右遇到第一位估计数字，就是最末一位有效数字，下一位数字一般可以按照四舍五入的原则进入有效数字的估计数字中。

例：

$$\begin{array}{r}
 13.0\bar{8} \text{ 厘米} \\
 309.2 \text{ 厘米} \\
 +) \quad 3.78\bar{5} \text{ 厘米} \\
 \hline
 326.\bar{0}\bar{6}\bar{5} \text{ 厘米}
 \end{array}$$

（数字上的横线表示这一位为估计数字）小数点后第一位已经是估计数字，计算结果应记做 326.1 厘米。是四位有效数字。

例：

$$\begin{array}{r}
 156\bar{3} \\
 \times) \quad 4.2 \\
 \hline
 312\bar{6} \\
 6252 \\
 \hline
 656\bar{4}\bar{6}
 \end{array}$$

个位数已经是估计数字，计算结果写做 66，为两位有效数字。

**游标卡尺** 是较精密地测物体的内、外直径、宽度、厚度、深度等长度的仪器。不同的游标卡尺测量长度可准确到 0.1 毫米、0.5 毫米或

0.02 毫米。

游标卡尺的构造如图(1)所示，由主尺和一个游标组成，游标可以在主尺上滑动。游标和主尺之间有一弹簧片，利用弹簧片的弹力使游标靠紧主尺。游标顶上有一旋紧螺丝，旋紧螺丝可将游标固定在主尺上的任何位置。主尺和游标都附有卡脚。图(1)中 1、2 是内卡脚，3、4 是外卡脚，有的游标卡尺，在主尺背面嵌有一根镶条 5，它和游标固定在一起，可测量槽、筒等的深度。

准确度是 0.1 毫米的游标卡尺。主尺和游标上都有刻度，主尺上的最小刻度是毫米，游标上的刻度是把主尺上的 9 毫米 10 等分为 10 格。因此，游标尺的每一分度比主尺最小分度相差 0.1 毫米。卡尺的卡脚并拢时，主尺和游标零刻度对齐，这时游标第一格与主尺 1 毫米刻度相差 0.1 毫米；游标第二格与主尺 2 毫米刻度相差 0.2 毫米；……0 以此类推，至游标第十格与主尺 10 毫米刻度相差 1 毫米，因此与主尺 9 毫米对齐。如图(2)所示。

如果卡脚间所量为 0.1 毫米，游标相应移动 0.1 毫米，游标的零刻度会离开主尺零刻度位置，其第一格正好与主尺 1 毫米刻度对齐，若所量为 0.2 毫米，游标第二格与主尺 2 毫米刻度对齐；……以此类推，这样，我们把游标上刻度第一格标为“0.1 毫米”、第二格标为“0.2 毫米”，等等，就可以根据游标上所对齐的那条线，直接、准确地读出毫米以下读数。利用主尺与游标的公差，就能够把测量精度提高到 0.1 毫米。在测量的长度大于 1 毫米时，整的毫米数由主尺上读出，十分之几毫米从游标上读出。例如，图(3)中所测长度为 6.6 毫米。

如果所用卡尺游标上有 20 等分格，它的每一小格与主尺每 1 毫米相差 0.05 毫米，每一小格对应读作“0.05 毫米”、“0.10 毫米”、“0.15 毫米”、……，使用时，整毫米数由主尺读出，毫米以下（二十分之几毫米）数，由游标与主尺所对齐的那条线读出。卡尺的游标有 50 个等分格时，每个小格与主尺每 1 毫米相差 0.02 毫米，每一小格对应读作“0.02”毫米、“0.04 毫米”、“0.6 毫米”、……。测量读出方法同上。

使用游标尺前，先将卡脚并拢查看游标尺与主尺零刻度是否对齐，不齐时，即有零点误差，在最后测量结果上要进行零点误差修正。若测量前，游标“0”刻度在主尺“0”刻度右侧时，在游标上已有读数 A，用这把卡尺测量时，应在最后测量结果上减掉 A；若测量前，游标“0”在主尺“0”左侧时，游标上的读数为 A'，用这把卡尺测量时，应在最后测量结果上加上(1-A')毫米。例如，测量图(3)时用的卡尺，长脚并拢时，零点误差如图(4)所示。游标“0.8”毫米刻度线与主尺上毫米刻度线对齐，零点误差为(1-0.8)毫米=0.2 毫米。用它测量的长度应该为： $(6.6+0.2)$ 毫米=6.8 毫米。

**螺旋测微器** 又叫千分尺。是较精密地测量物体的外径、厚度、宽度等长度的测量仪器。量程在 0—25 毫米，精度可达 0.01 毫米。其结构如图(1)所示，活动卡脚和套管之间有螺旋配合当鼓轮带动卡脚在套管中转动时，活动卡脚的端面就会前进或后退。保护旋钮通过弹簧销钉与鼓轮连接。当活动卡脚与固定卡脚卡紧被测物时，再旋转保护旋钮就会空转，不再推进卡脚，起保护套管和卡脚螺纹的作用。在套管上刻有一条

横线，横线上、下有两列刻度线，从下面的刻度线可以读出毫米数，从上面的刻度线可以读出 0.5 毫米数。鼓轮一端边缘上的圆周分成 50 等分刻度线。见图(2)。

当两卡脚接触时，鼓轮的边缘刚好和套管的零线重合，同时鼓轮上的零线也刚好和套管上的横线重合。活动卡脚上螺纹的螺距为 0.5 毫米，当鼓轮带动活动卡脚转一周时，活动卡脚就会前进或后退 0.5 毫米，将鼓轮边缘圆周 50 等分，当鼓轮带动活动卡脚旋转 1/50 周时，活动卡脚端面就相对移动 0.01 毫米。鼓轮边缘上第一等分就表示 0.01 毫米。我们从套管和鼓轮上的刻度就可读出两卡脚端面间的距离。

在读数时要注意，首先从套管上读出整毫米数，再观察套管上表示 0.5 毫米的刻度线是否露出，如果露出，则还应在整毫米数后面加上 0.5 毫米。然后看鼓轮边缘上的哪条刻度线与套管上的横线对齐，读出其数值。注意：读鼓轮上的数时要再估计一位，即可读到 0.001 位。故螺旋测微器又称千分尺。将以上所读各数加起来就是所测物体长度。如图(2)测微器的读数为 7.758 毫米。

使用螺旋测微器测量物体长度前，也要先进行零点误差修正。当旋紧卡脚时，若鼓轮“0”线在套管横线下边，测量前鼓轮上已有读数 A。则在测量结果上应减掉 A。若鼓轮“0”线在套管横线上边，鼓轮上有读数 A'，则在测量结果上应加上 (0.50—A')。例如，一螺旋测微器的零点误差如图(3)所示，则其零点误差为 0.058 毫米；另一螺旋测微器的零点误差如图(4)所示，其零点误差为(0.50—0.478)毫米，即等于 0.022 毫米。用图 3 螺旋测微器测量的结果上应减掉 0.058 毫米；用图 4 螺旋测微器测量的结果上应加上 0.022 毫米。

使用螺旋测微器应注意，将被测物放在两卡脚间时，一只手持千分尺的曲柄（在曲柄上装有绝热护板，以防手温使曲柄膨胀引起微小误差），另一只手旋转保护旋钮，听到“咔、咔”声，即停止转动，绝不可强拧鼓轮，以防损坏螺纹。

**测定匀变速直线运动的加速度** 研究匀加速直线运动的实验装置如图(1)所示，用小桶装砂子通过线牵引小车，小车拖着纸带，通过打点记时器。当小车做匀加速直线运动时，打点记时器就在纸带上记录下一系列记时点。通过研究这些点之间距离关系，可测定小车的加速度。首先进行纸带处理。让开太密集的前几个点，取起始记数点，并标以“0”，以后逐点或隔间隔相同点数的记时点顺序标上“1”、“2”、“3”、……等等，如图(2)所示。这些点称为记数点。然后测量位移，就是小车在  $T = (n+1) \times 0.02$  秒（n 为两记数点之间的记时点数，且两记时点间记时周期为 0.02 秒）间隔内的位移： $s_1、s_2、s_3、\dots、s_n、\dots$ 。(2)

根据纸带和测量数据，在纸带上任找两段位移  $s_i$  和  $s_j$ ，则小车的加速度。

$$a = \frac{s_j - s_i}{(j-i)T^2} = \frac{s_j - s_i}{[j-i][(n+1) \times 0.02]^2} \quad (j > i)$$

（统一使用国际单位制）

用图线来测定加速度的方法。由速度公式  $v=v_0 + at$  可知匀加速直线运动的  $v - t$  图线是一条直线。直线与纵坐标轴的截距为初速度  $v_0$ ，直线

的斜率  $\text{tga} = a$ ，即匀加速直线运动的加速度。根据匀加速直线运动物体在某一段时间内的平均速度等于这段时间中点时刻的即时速度，则  $v_1 = \frac{s_1 + s_2}{2T}$ ， $v_2 = \frac{s_2 + s_3}{2T}$ ， $v_3 = \frac{s_3 + s_4}{2T}$ ，……，对应时刻  $t_1 = (n+1) \times 0.02$  秒， $t_2 = (n+1) \times 0.02$  秒， $t_3 = 3(n+1) \times 0.02$  秒……。用纵坐标表示速度，用横坐标表示时间，建立坐标系，将  $(t_1, v_1)$ 、 $(t_2, v_2)$ 、 $(t_3, v_3)$ 、……各点标在坐标平面上，连出直线，求出该直线的斜率就得到小车的加速度。

根据上面介绍的方法，可得到图(3)所示的  $v-t$  图线。

如何用单摆测重力加速度 单摆的振动周期公式为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

如果测得单摆的振动周期  $T$  及摆长  $l$ ，就可以算出重力加速度  $g$  值，即

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$$

选取一段 1 米左右的细线，一端穿过小球的小孔并系好，另一端固定在铁架台上构成单摆。测量摆长时，应从摆球的质心测到悬点的长度。为保持单摆做简谐振动，摆角要小于  $5^\circ$ ，对于摆长约 1 米的单摆，振幅约为 9 厘米即可。单摆的周期用秒表测出几次全振动所用的时间，再算平均值的办法。

在实际的测量操作过程中要注意：测周期时，开始记时应在平衡位置，因为摆球经过平衡位置时速度最大，摆球通过此位置的时间间隔就小，记时误差就会小些。为了能够准确确定摆球是否正好通过平衡位置，可在单摆平衡位置的下方放一根铅笔或其它物体做为记号，或者以摆线的投影和铁架台的竖直杆平行做为标志。当记时且计数时，先让单摆摆动起来，观察单摆正常摆动后（注意不要形成圆锥摆），当摆球通过平衡位置，按下秒表的开关，同时从零开始计数，默数“零、一、二、……”，数到“三十”（或“五十”）次时，同时停表。改变摆长，多次测量。

数据处理可采用作图法。根据单摆振动周期公式可知，单摆周期的平方  $T^2$  跟摆长  $l$  成正比，以  $T^2$  为纵坐标，以  $l$  为横坐标做  $T^2-l$  图线，是一条通过原点的直线，其斜率

$$\text{tga} = \frac{1}{g} 4\pi^2$$

则： $g = \frac{4\pi^2}{\text{tga}}$  根据表格中所列的各项记录，并根据记录做出  $T^2-l$

图线，在图线上找到一点的坐标  $(l, T^2)$  求出斜率  $\text{tga} = \frac{T^2}{l}$ ，并代入

$g = \frac{4\pi^2}{\text{tga}}$ ，求出重力加速度的值。

除利用图线来求  $g$  外，还可利用多次测量取平均值的办法，把各次由公

式  $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$  所求得的  $g$  值加起来除以测量次数

$$\bar{g} = \frac{g_1 + g_2 + \dots + g_n}{n}$$

实验次数	摆长 $l(\text{m})$	振动周期 $T$		$T^2(\text{s}^2)$	加速度 $g = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}$ ( $\text{m/s}^2$ )	摆长比 $l_n/l_5$	周期平方比 $T_n^2/T_5^2$
		$nT(\text{s})$	$T(\text{s})$				
1							
2							
3							
4							
5							

**冲击摆** 用来测弹丸速度的仪器。它的构造如图(1)所示。弹簧枪：弹丸发射器。枪栓可由扳机固定在三个不同位置上。分别以不同的速度发射弹丸。

弹丸：质量约 7.6 克的钢珠。

摆块：质量约 80 克，由四根长约 27 厘米摆线悬挂在支架上，四条线的长度可由调节螺丝调节。摆块向枪口一侧有圆孔，孔内有塑料泡沫缓冲，子弹射入其中发生完全非弹性碰撞。

指针：在摆块的推动下偏转，可通过刻度盘指示摆线偏转的最大角度。刻度盘最小分度为  $0.5^\circ$ 。

利用冲击摆测定快速运动弹丸的速度的基本原理，如图(2)：

设弹丸出膛时动量为  $mv$ ，它与摆块发生完全非弹性碰撞后，与摆块一起的速度为  $v$ 。此时，动量为  $(M+m)v$ 。其中  $m$  和  $M$  分别为弹丸和摆块的质量。根据动量守恒定律

$$mv = (M+m)v \quad (1)$$

碰撞后摆块（加上弹丸）的动能为  $\frac{1}{2}(M+m)v^2$ ，摆动过程中，势能增加动能减少，当摆块摆到最大高度  $h$  时，势能为  $(M+m)gh$ ，根据机械能守恒定律

$$\frac{1}{2}(M+m)v^2 = (M+m)gh$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

$$\text{又 } h = l - l \cos \theta \quad (3)$$

将(2)、(3)式代入(1)式，整理得

$$v = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos \theta)} \quad (3)$$

其中： $l$  为摆线长； $\theta$  为摆块最高时摆线与竖直方向夹角，由刻度盘读出。

哥白尼(1478—1542)波兰伟大的天文学家，“日心说”的创史人。哥白尼是历史上最杰出的天文学家，博才多学，精通多种语言，对

数学、文学、神学等都有很深的造诣。

哥白尼宇宙日心体系的创立，以科学的观点否定了在西方统治一千多年的地心说，是自然科学向神学的第一次严正挑战，是天文学史上的一次伟大革命，是人类宇宙观的重大革新。在《天体运行论》的第一卷中，哥白尼明确地提出日心学说，认为太阳是宇宙中心，并把地球从以往的宇宙中心位置降为普通的行星，以此断言地球有三种运动形式，即：第一种是地球自东向西绕轴昼夜自转；第二种是地球绕日的周年旋转；第三种是地球的回转运动，即自转轴或赤道面相对于日、地连线的运动。哥白尼依据地球的以上三种运动与各天体的自身运动解释了从地面上观察到的天体运动现象，而使原来以地球为中心的宇宙运动解释大大简化。以太阳为中心的宇宙体系中认为，天体从远到近顺序排列是：恒星天球，它本身是不动的；土星，三十年转一周；木星，十二年转一周；火星，两年转一周；地球和同它一起的月亮一年转一周；金星，九个月转一周；水星，八十天转一周。还得出了各行星到太阳的距离。哥白尼是深受毕达哥拉斯学派思想影响的人，追求数学上的和谐，坚信宇宙是美好而有秩序的，因而提出把匀速圆周运动看作是最完美和谐的天体运动形式。哥白尼的这个体系，每个行星轨道及运动的速率有序排列，显示了宇宙的对称性。

哥白尼的学说比起托勒密的“地心说”及其对天体运动的描述要简单得多，更符合宇宙的真实运动。哥白尼的工作为解释行星运动开辟了一条路径，启发了后来开普勒行星运动三大定律的发现，进而为牛顿万有引力定律的建立奠定了基础。

胡克(1635—1703)英国物理学家、天文学家。

胡克是17世纪英国最杰出的科学家之一。他在力学，光学，天文学等方面都有重大成就。

胡克在力学方面贡献卓著，在引力问题的研究上，他觉察到引力和重力有相同的本质，并且进行实验，企图测定重力随离地心的距离而变化的关系，但没有得出结果，但他提出，一但知道此关系，天文学家就很容易找到解决天体运动的规律了。1680年初，在给牛顿的信中，胡克提出了引力和距离平方成反比的猜测，但由于数学手段缺乏，没有得出定量表示。

胡克定律是胡克最重要的发现之一，是力学最重要的基本定律之一，为了这一定律，胡克曾做了大量实验，包括各种材料构成的弹性体。

在光学方面，胡克是光的波动说的支持者。在他的《显微术》一书中，记载了他观察到的几何影中的衍射现象。通过实验还研究了薄膜上的干涉，进一步提出了光波是横波的概念。在光学研究中，胡克进行了大量的光学实验，制做发明了显微镜、望远镜等多种光学仪器。

胡克还对波耳定律提出了解释。他在1678年提出，空气是由大量快速运动的粒子组成的，它们对容器的四壁的频繁碰撞，形成对器壁的压力。从气体的微观结构对气压现象进行解释，为物理学的研究从宏观走向微观指出了方向。

胡克在天文学、生物学等方面也有贡献，他用自己制造的望远镜观察了火星的运动；用自己制造的显微镜观察植物组织，于1665年发现植物细胞（注：实际是细胞壁），并命名为“cell”，沿用至今。

胡克是与牛顿同时代的伟大科学家，他在物理学的很多方面贡献卓著。尤其在光学和力学方面是仅次于牛顿的伟大科学家。他的发明创造极为丰富，他制做的仪器是非常精巧的。

卡文迪许(1731—1810) 英国物理学家、化学家。1749年至1753年在剑桥大学彼德豪斯学院学习。三年后离开剑桥到伦敦居住，过着隐居式的生活，卡文迪许的一生都是在他的实验室和图书馆里度过的。他全靠自费进行研究，很少与外人交往，是一位谨慎而谦虚的科学家。他所从事的研究涉及各种不同学科，由于他对财产和荣誉看得很轻，因此他的研究成果都没有及时发表。他的实验研究活动早已被科学界所重视，1760年，年仅29岁的卡文迪许便成了英国皇家学会会员。1810年3月10日卡文迪许在伦敦逝世，终年79岁。他死后留下一大笔财产和20捆研究手稿，直到19世纪中叶英国物理学家威廉·汤姆生才在卡文迪许的手稿中发现一些珍贵资料。1879年由英国著名物理学家麦克斯韦整理、注释出版了这些手稿。

1778年，卡文迪许进行了著名的扭秤实验。第一次在实验室里比较准确地测出了万有引力恒量的数值： $6.754 \times 10^{-11}$  牛·米<sup>2</sup>/千克<sup>2</sup>，同现代公认的  $6.67 \times 10^{-11}$  牛·米<sup>2</sup>/千克<sup>2</sup> 很接近。卡文迪许还依上述实验测算了地球的密度。

卡文迪许还从实验中得出一对电荷之间的作用力跟它们之间的距离平方成反比。他还提出了静电电容、电容率、电势能等概念。

卡文迪许在热学理论、化学、计量学、气象学等方面也有重要贡献，19世纪末，剑桥大学建立了卡文迪许实验室，这是对他的贡献的肯定。

惠更斯(1629—1695) 荷兰物理学家、数学家、天文学家。

惠更斯在物理学方面，对力学的发展和光学的研究都有杰出的贡献。

惠更斯在关于碰撞过程的研究中，颇巨将心地运用了相对性原理，得出了许多重要的力学原理。惠更斯对摆的研究取得了最突出的成果。1656年他根据伽利略发现的摆的等时性，制成了第一座机械钟。在1673年出版的著作里，惠更斯提出了摆的数学理论，导出单摆的运动定律，即周期公式

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

他根据这一公式，在巴黎用一个周期是2秒的单摆，精确测出摆长，第一个计算出重力加速度的值。惠更斯的工作与精密摆钟结构问题紧密联系，并为发现重量与质量两个概念的差异提供了一个条件。

1673年惠更斯根据他所做的摆的实验和一般圆周运动的实验，得出了离心力公式。

惠更斯在光学方面，坚持光的波动说，1678年他完成了《光论》一书，在这里他提出了光的波动说，建立了著名的惠更斯原理。应用于反射，折射和双折射现象的解释时，获得了成功。由于惠更斯的光的波动说不够完善，对光的偏振等现象无法解释，遭到以牛顿为首的主张光的微粒说的一派的反对，致使他的光的波动说被忽视一个多世纪。

惠更斯在天文学方面贡献也很大，他用自己创造的望远镜进行天文观测，先后发现了土星的光环和木星的卫星，还发现了猎户座星云、火

星极冠等。在数学方面，他在 22 岁时就发表过关于计算圆周长椭圆弧及双曲线的著作，对微积分、概率方面也有研究成果。

阿基米德（公元前 187—前 212）古希腊最杰出的数学家和力学奠基人。阿基米德出生于叙拉古的一个数学家和天文学家的贵族家庭，他青年时代曾在亚历山大里亚学习，在那里研究天文学，数学和力学。阿基米德在科学许多方面贡献卓著，在亚历山大里亚期间，曾因发明了“阿基米德螺旋提水器”等而出名。几何学方面，以阿基米德名字命名的阿基米德螺线，在现代机械中广为应用，在凸轮的轮廓线应用此螺线，可以把匀速圆周运动转变为匀速直线运动。他确定的圆周率在 $3\frac{1}{71}$ 和 $3\frac{1}{7}$

之间，已精确到百分位。还著有《论抛物线问题》、《论螺线》等论著，并解决了很多数学难题。他是著名几何学家欧几里德的学生。

在力学方面，贡献尤为突出。阿基米德是静力学的真正创史人，他在静力学方面的主要著作有《论平面的平衡》和《论浮体》等。在《论平面的平衡》一书中，运用几何学的方法通过严密的逻辑证明，得到了杠杆原理。杠杆原理的发现和运用引起了当时的轰动，据说阿基米德曾对叙拉古的希罗王宣称：“给我一个稳固的支点，我就能把地球挪动！”著名的阿基米德浮力定律是他在力学上的又一重要成果，传说浮力定律是他在解决为希罗王检验金王冠内是否掺假之一难题，在洗澡时突然发现的。阿基米德在《论浮体》一书中，通过严密的逻辑方法证明了他的浮力定律，得到：浸入液体的物体失去的重力，就等于它排开的液体的重力。这就是著名的阿基米德定律。

阿基米德在机械的发明和创造方面都取得了巨大成就，他发明的许多仪器和机械在军事上应用很多。他制作的行星仪，能显示天体表面运动情况，及日蚀，月蚀现象。公元 212 年，叙拉古被罗马军队占领，正在专心研究问题的阿基米德被闯进来的无知的罗马士兵杀死，终年 75 岁。

伽利略（1564 - 1642）意大利物理学家、天文学家、数学家，近代实验科学的创史人。

伽利略一生中的科学贡献是极其巨大的。他的科学活动主要集中在天文学和力学方面。

在天文学方面，伽利略坚持和发展了哥白尼的“日心说”。通过对天文的长期观测，发现了太阳黑子的有规律活动，表明太阳在以一定周期自转；月球表面有深谷、高山和平原，并不是光滑的；金星的盈亏变化；还发现了银河由无数颗星星组成；木星有四颗卫星，等等。表明地球并非宇宙的中心，因而触犯了教会的教规，受到了教会的严厉迫害。

在力学方面，伽利略的运动理论是经典力学的奠基性工作。他首先抛弃了以往对运动的描述方法，依据运动的基本特征量速度，对运动进行了正确的分类。定义了匀速运动、匀加速直线运动。找出了运动的时间和距离的关系的定律，使运动理论的研究取得了重大进展。伽利略首先从一个思想实验得出的佯谬入手，对亚里士多德的落体学说提出反驳，通过大量的实验事实，提出匀加速直线运动的定义，证实了“物体坠落的路程与它所经历的时间平方成正比”的落体定律。

伽利略最先研究了惯性运动和落体运动规律，并把力的作用同运动

状态的变化联系起来，从而把运动学的研究引上了正确的方向，为牛顿第一定律和牛顿第二定律的研究做了奠基性工作。

伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。伽利略的研究方法认为，数学是人类思维的一种完全可靠的逻辑形式，实验作为发现定律和验证定律正确与否的手段，并应用实验和逻辑（数学）结合起来的方法，按照：对现象的一般性观察 提出工作假设 运用数学和逻辑的手段得出特殊结论 通过物理的或思想的实验对推论进行检查 对假设进行修正和推广，等等，有效程序。发现了很多最基本的定理，推动了人类科学认识活动，开创了物理学发展新纪元。

开普勒(1571—1630) 德国天文学家 占星学家、数学家。

开普勒卓越的贡献是建立了行星运动的三个定律。对火星轨道的研究，是开普勒重新研究天体运动的起点，从其复杂的计算结果与第谷观测数据之间的误差中敏感地觉察到行星的轨道不是一个圆周，进而研究发现火星的轨道是一种“卵形线”。通过复杂的计算，开普勒终于发现，这个曲线就是古希腊人早已研究过的椭圆；进而研究又发现每个行星都沿椭圆轨道运行，太阳就在这些轨道的一个焦点上，这就是开普勒第一定律——轨道定律。通过对地球和火星在离太阳近时运动得快，而在离太阳远时运动得慢，经过计算又得到了开普勒第二定律——面积定律。1609年出版的《新天文学》一书中公布了上述两定律。开普勒三定律——周期定律，是在《世界的和谐》一书里公布的。

开普勒的行星运动三大定律的发现，为牛顿发现万有引力定律，提供了理论基础。开普勒的数学才能帮助了他从大量的数据中找到物理量之间的联系。并且从他开始，数学方程就成为表达物理定律的基本方式。

牛顿(1642—1727) 英国物理学家、数学家，经典力学的奠基人，微积分的创建人之一。1642年12月25日生于英格兰林肯郡的沃斯索普村一个农民家庭。少年时代天资平常，但喜欢制作各种机械模型。他曾辍学务农，后在舅父和中学校长的支持下得以复学，进入格兰山母镇皇家中学学习。1661年考入剑桥大学三一学院学习。在数学家伊萨克·巴洛的引导下走上自然科学的研究，这期间他已经在数学的二项式定理、微分学、光学的颜色论及力学等方面默默地做出了惊人的发现。1665年至1667年为躲避瘟疫回到家乡18个月，作出了在万有引力、微积分和光的色散等方面的重大发现。1667年牛顿返回剑桥当研究生，次年获得硕士学位，1669年由巴洛推荐，接替了卢卡斯数学讲座教授职务。1672年由于制造反射望远镜的成就被接纳为伦敦皇家学会会员，仍在剑桥大学工作。1696年迁居伦敦，任皇家造币厂监督。1703年被选为皇家学会会长，一直连任到逝世。由于他在科学研究和币制改革上的功绩，1705年被封为爵士。牛顿终生未娶，晚年由他的外甥女照顾。1727年3月20日逝世于肯辛顿村，在威斯敏斯特教堂为他举行了隆重的国葬。

牛顿完成了经典力学的奠基工作。牛顿的三个定律的建立，把前人对物理规律的认识上升到理论，完成了科学先辈们开始的科学革命。是近代自然科学史上的巨人。

牛顿在伽利略等前人的工作基础上，深入研究，于1687年出版了他的著作《自然哲学的数学原理》，标志着经典力学体系的建立。这部著作

作分为绪论和三篇正文。在绪论和第一篇中，给出了几个基本物理概念，如，质量、动量、惯性、力等的定义和注释，运动的三大基本定律及这些定律与天文学有关问题上的应用，万有引力的数学定理等。第二篇讨论了物体在阻力和介质中的运动。第三篇讨论了天体力学问题，行星运动、潮汐现象等。《原理》以严谨清晰的系统，丰富的内容和精湛的思想，发展了力学现象的数学处理方法，为尔后各种物理学理论体系的建立树立了一个典范。

牛顿的《原理》、《光学》及有关微积分的论著等杰作，使牛顿成为一个有创见的伟大的物理学家。他还确立了研究物理现象的科学方法，即“物理思维”：在实验的基础上确定最一般的规律——原理或原则，通过推理从中得出个别的定律或定理，再通过实验来验证，通过实验与这些结论的相符，就证明了这些基本定理正确。他大量地运用数学方法来系统地整理物理理论。

我们提到的牛顿三定律，实际上是牛顿对前人工作的总结、提高和发展，前人的功绩是不可磨灭的。随着物理学的发展，直到相对论和量子论建立以后，才对他的理论进行了某些关键性的修正或纠正。

## 二、热学

**分子运动论** 认为物体是由大量永不停息地做无规则运动的分子所组成，分子之间存在着引力和斥力等相互作用，并以大量分子的集体行为来说明气体、液体和固体等物质状态的有关物理性质，特别是它们各自的热力学特性的物质结构学说。

人类早在古希腊时代就出现了物质的微粒结构的思想。德谟克利特等人曾想象物质是由不可再分割称之为“原子”的粒子组成，并认为不同的物质由不同的“原子”构成。直到 17、18 世纪期间，随着热学的发展，人们开始探讨热现象的本质，出现了分子运动论的学说。经伽桑迪、胡克、伯努利等人的考察和不断发展这一学说，并用以说明物质的液体、固体、气体三种状态的转变，设想气体的压力是气体分子与器壁碰撞的结果，从而导出了玻意耳-马略特定律。1744 年罗蒙诺索夫明确提出热是分子无规则运动的表现，把机械运动守恒定律推广到分子运动的热现象中去。19 世纪中叶建立了能的转化守恒定律，分子运动论得到迅速的发展和完善。经克劳修斯、麦克斯韦和玻耳兹曼等人的大量工作，他们立足于分子运动论以早期的统计观点导出了气体的压强公式，从而解释了有关气体的实验定律；认识了分子速度的分布规律；并给出了分子运动规律的定量方程。使分子运动论在经典物理学的范畴内达到了完善的程度。

**分子** 物质中能够独立存在的相对稳定并保持该物质物理化学特性的最小单元。分子由原子组成。有单原子分子、双原子分子和多原子分子之分。

一般的分子都很小，如果简化把分子看作小球，直径的数量级都是  $10^{-10}$  米。例如水分子 ( $H_2O$ ) 的直径是  $4.0 \times 10^{-10}$  米，氢分子的直径是  $2.3 \times 10^{-10}$  米。

用油膜法可以粗略地测定油分子的大小。把事先测出体积  $V$  的油滴滴到水面上，使油在水面上尽可能地分散开，接近形成单分子油膜。这层单分子油膜的厚度就可以认为等于看作为小球的油分子的直径。如果油膜呈圆形，测出圆面的直径为  $R$ ，那么油膜的厚度  $h$  (即认为等于油分子直径  $d$ ) 的计算式为：

$$h = \frac{V}{\pi R^2}$$

由此 
$$d = \frac{V}{\pi R^2}$$

应用可以放大百万倍的场离子显微镜测定钨原子的直径约为  $2 \times 10^{-10}$  米

**场离子显微镜** 构造的主要部分是由球形玻璃容器和一根针状电极组成。针状电极用所要研究的材料 (如金属钨) 制成，针尖的表面被加工成为曲率半径  $r$  在  $1.0 \times 10^{-8} \sim 10.0 \times 10^{-8}$  米范围的小球面，置于球形容器的中心。半径  $R$  为 10 厘米左右的球形玻璃容器，内壁上涂有一层很薄的导电物质和具有高发光率的荧光材料，将容器内空气抽出后充入少量的氦成为压强  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  毫米汞柱的成像气体。如图(1)所示。

工作时在针状电极和容器内壁导电层之间加上 5 ~ 30 千伏的高电

压，针状电极为正，导电层为负。在针尖和容器壁之间的空间就出现了辐射状的电场，针尖附近的电场强度可高达  $10^{10}$  伏 / 米。当做无规则运动的氦分子（即氦原子）在接近针尖表面的原子时被电离成为失去电子的氦离子，在强电场作用下被加速沿径向电场运动，以很大速度打到容器内壁的荧光材料上使之发光，这样就在容器壁——荧光屏上出现了针尖上原子分布的图样。

场离子显微镜的放大原理比较简单。图(2)是放大原理示意图。图中弧长  $ab$  表示相邻两个所研究材料的原子间的距离，弧长  $\widehat{AB}$  则表示它们在球形容器的内壁上的像之间的距离， $\widehat{ab}$  与  $\widehat{AB}$  所对的圆心角是同一角度，相对应的曲率半径分别为  $r$  和  $R$ ，因此有

$$\begin{aligned} \widehat{ab} &= r \quad , \text{ 或 } ab = r \quad ; \\ \widehat{AB} &= R \quad , \text{ 或 } AB = R \quad . \end{aligned}$$

所以场离子显微镜的放大倍数

$$K = \frac{AB}{ab} = \frac{R}{r}$$

设计状电极尖端的曲率半径  $r = 5.0 \times 10^{-8}$  米，球形玻璃容器的半径  $R = 10.0 \times 10^{-2}$  米，则  $K = 2.0 \times 10^6$ ，即放大 200 万倍。设想钨制的针尖上钨原子一个挨一个地排列，则可认为距离  $ab$  就等于钨原子的直径，测出玻璃壁上的  $AB$  长，即可计算出钨原子直径。实测表明钨原子直径约为  $2 \times 10^{-10}$  米。

**阿伏伽德罗常数** 是物理学和化学中的重要基本常数之一，即 1 摩尔任何物质所包含的基本单元数，以  $N_A$  表示。 $N_A = 6.0221367 \times 10^{23}$  摩<sup>-1</sup>（通常可取作  $N_A = 6.02 \times 10^{23}$  摩<sup>-1</sup>）。根据摩尔的定义，组成物质系统的基本单元可以是原子、分子，也可以是离子、电子、其他粒子或这些粒子的特定组合。例如 1 摩尔氧气即 32 克氧气，所含氧分子 ( $O_2$ ) 数为  $N_A$ ；而同样质量 (32 克) 的氧所含氧原子 ( $O$ )，即 2 摩尔氧原子数则应为  $2N_A$  个；同样质量 (32 克) 的臭氧所含臭氧分子

( $O_3$ )，即  $\frac{2}{3}$  摩尔臭氧分子数应为  $\frac{2}{3}N_A$ 。

阿伏伽德罗常数是微观世界的一个重要常数，是联系微观世界和宏观世界的桥梁。在分子物理学中，由于同一物质的分子质量  $m_i$  与摩尔质量  $M$  之间有  $m_i = \frac{M}{N_A}$  的关系，可见，阿伏伽德罗常数把摩尔质量等宏观物理量跟分子质量等微观物理量联系起来。

**分子大小的估算** 应用阿伏伽德罗常数以及宏观有关数据可以计算出分子的质量和分子平均占有体积。

分子质量的计算：由于 1 摩尔任何物质所包含的分子数都等于阿伏伽德罗常数，因此，根据某种物质的摩尔质量  $M$ ，应用阿伏伽德罗常数  $N_A$ ，即可计算出组成该物质的单个分子的质量  $m_i$ ： $m_i = \frac{M}{N_A}$ 。

如 1 个水分子的质量

如 1 个水分子的质量

$$m_i = \frac{18.02 \times 10^{-3} \text{ 千克 / 摩}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}} = 2.99 \times 10^{-26} \text{ 千克。}$$

分子平均占有体积的计算：同样道理，根据某种物质的摩尔体积  $V$ ，应用阿伏伽德罗常数  $N_A$ ，即可计算出组成该物质的单个分子的平均占有体积  $V_i$ ：

$$V_i = \frac{V}{N_A}$$

对于液体和固体来说，由于它们分子结构紧密，设想其中的分子是一个挨一个地排列着，就可以在计算出单个分子的平均占有体积  $V_i$  的基础上估算出单个分子的线度。

对于气体来说，由于分子间的平均距离远大于分子的线度，根据单个分子的平均占有空间体积  $V_i$  只能估算出气体分子间的平均距离  $l$ ：

$$l = \sqrt[3]{V_i}$$

例如在标准状态（温度  $0^\circ\text{C}$ ，压强 1 标准大气压）下，1 摩尔任何气体所占有的容积——即摩尔体积——均为  $22.41383 \times 10^{-3} \text{ 米}^3$ （通常可取作 22.4 升），因此单个气体分子所占有的空间容积

$$V_i = \frac{22.4 \times 10^{-3} \text{ 米}^3 / \text{摩}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}} = 3.72 \times 10^{-26} \text{ 米}^3$$

由此可得气体分子之间的平均距离

$$l = \sqrt[3]{V_i} = \sqrt[3]{3.72 \times 10^{-26} \text{ 米}^3} = 3.34 \times 10^{-9} \text{ 米。}$$

**分子的热运动** 物体里分子永不停息的无规则运动。在大量实验事实（如扩散、布朗运动等等）的基础上人们认识到，构成物体的大量分子（以及原子、电子等）一直是在永不停息地做无规则运动。这种运动跟温度有密切关系，温度越高，分子的无规则运动越激烈。通常所说的“热”实质上是物质的一种运动形式。微观范围大量分子无规则运动剧烈程度的宏观反映就表现为温度的高低，因此称大量分子的这种无规则运动为热运动。要强调说明，分子的热运动是大量分子的行为，它的整体有着统计规律性。宏观上测定的量（如温度），反映了与大量微观粒子运动相应的统计平均值（如分子热运动的平均平动能）。

**扩散** 由于分子（原子等）的热运动而产生的物质迁移现象。一般可发生在一种或几种物质于同一物态或不同物态之间，由不同区域之间的浓度差或温度差所引起，前者居多。一般从浓度较高的区域向较低的区域进行扩散，直到同一物态内各部分各种物质的浓度达到均匀或两种物态间各种物质的浓度达到平衡为止。显然，由于分子的热运动，这种“均匀”、“平衡”都属于“动态平衡”，即在同一时间内，界面两侧交换的粒子数相等。例如红棕色的二氧化氮在静止的空气中的散播，蓝色的硫酸铜溶液与静止的水相互渗入，钢制零件表面的渗碳以及使纯净半导体材料成为 N 型或 P 型半导体掺杂工艺等等都是扩散现象的具体体现；在电学中半导体 PN 结的形成过程中，自由电子和空穴的扩散运动是基本依据。扩散速度在气体中最大，液体中其次，固体中最小，而且浓度差越大、温度越高、参与的粒子质量越小，扩散速度也越大。

**布朗运动** 悬浮在液体或气体中的微粒（线度  $\sim 10^{-3}$  毫米）表现出

的永不停止的无规则运动。于 1827 年由英国植物学家布朗用显微镜观察悬浮在水中的花粉时，首先发现花粉颗粒所做的这种运动。以后，人们发现在温度均匀、无外力作用的流体中都能观察到这类微粒的布朗运动。例如墨汁稀释后碳粒在水中的无规则运动，藤黄颗粒在水中的无规则运动……。而且温度越高，微粒的布朗运动越剧烈。发现后的 50 年内，人们一直不了解这种运动的原因。直到 1877 年德耳索提出，这是由于微小颗粒受到它周围液体（或气体）分子碰撞作用的不平衡性而引起的，认识到液体（或气体）分子永不停息的无规则运动是产生微粒的布朗运动的原因。到 1905 年及以后几年内经爱因斯坦等人的理论研究和定量实验，对布朗运动的性质和解释完全清楚了，成为分子运动论和统计力学发展的重要转折点。确切解释的梗概是：线度约  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  毫米的微粒受到它周围流体大数分子热运动的不规则频繁碰撞（液体分子每秒约  $10^{19}$  次、气体分子每秒约  $10^{15}$  次），若某一瞬间在某一方面碰撞数大大超过其他方面的碰撞数，微粒就会产生一明显位移。这种不平衡碰撞产生的力是一种涨落不定的净作用力，它驱动着“布朗颗粒”做无规则运动。布朗运动代表了一种随机涨落现象，它不仅反映了周围流体内部分子运动的无规则性，关于它的理论在其他许多领域也有重要应用，如对测量仪表测量精度限度的研究、对高倍放大的电讯电路中背景噪声的研究等等。

**分子间的相互作用力** 分子间同时存在着引力和斥力，它们的大小都跟分子间的距离有关。分子间的相互作用起源于电磁力。每个组成分子的原子都有分别带正、负电的原子核和核外电子，以呈电中性的单原子分子为例，它的核外电子的总负电量与原子核的正电量不仅大小相等，而且当保持它们的正常位置不变时，它们的正、负电荷对外的总作用效果为零。如果两分子相互靠近到一定程度时，每个分子中的电荷分布都要稍微离开正常位置，导致出现分子间的相互作用。这时分子力一部分是由于带电粒子间的静电力，在异种电荷间的平均距离小于同种电荷间的平均距离的情况下，分子间主要表现为吸引力；另外还决定于电子在运动过程中某些特定的相互联系（如运动情况完全相似的电子具有互相回避的倾向），当两分子靠得非常近，以致它们的外层电子云开始重叠起来时，分子间主要表现为排斥力。这些诸多因素综合起作用的结果，形成了分子间作用力的吸引、排斥性质的不同以及大小等均随距离变化的较为复杂的表现。

对于比较复杂的分子间相互作用情况，为处理问题方便，可采用一些简化模型做近似描述。如图所示分子力跟距离的关系，是其中一种理想模型。图中两条虚线分别表示两分子间同时存在的引力和斥力随距离变化的情形，实线表示它们的合力即实际表现出来的分子间的作用力随距离变化的情形。图示引力和斥力都随距离的增大而减小、随距离的减小而增大，但斥力比引力随距离变化得快。当两分子间距离等于  $r_0$  时，引力与斥力平衡，分子力为零，分子处于平衡位置。 $r_0$  的数量级约为  $10^{-10}$  米。显然，当分子间距离  $r < r_0$  时，分子力表现为斥力；当  $r > r_0$  时，分子力表现为引力。除  $r$  值稍大于  $r_0$  的一小段范围外，一般来说，表现为引力的分子力随着距离的增大而迅速减少，当分子间的距离的数量级大

于  $10^{-9}$  米时，已经变得十分微弱，可以忽略不计了。

**温度** 是表征物体冷热程度的一个宏观物理量。从分子运动论的观点来看，温度是物体分子热运动剧烈程度的宏观标志。

对于理想气体来说，气体分子热运动的平均平动动能  $\bar{\varepsilon}$  与气体的热力学温度  $T$  的关系是

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2}kT$$

其中  $k$  叫做玻尔兹曼常数， $k = \frac{R}{N_A}$ （ $R$  是摩尔气体恒量、 $N_A$  是阿

伏伽德罗常数）。

可见，气体的热力学温度是气体分子热运动平均平动动能的量度。

作为初步的认识，通常在中学教科书中只笼统地说“温度是物体分子热运动的平均动能的标志”。

温度是大量分子热运动的集体表现，是与微观量（分子平动能）的统计平均值有关的宏观量。而对于单个分子来说，温度是没有意义的。

**物体的内能** 物体中所有分子的热运动的动能和分子势能的总和。严格地说，物体的内能还应包括组成分子的原子内的能量及原子核内的能量，只是在物体经历的热力学过程中，这些原子内和原子核内的能量都不发生变化。所以在热力学中，内能一般仅指分子热运动的动能和分子势能。

物体的内能是由它内部状态所决定的能量。由于分子热运动的动能跟物体的温度有关系，相互作用的分子间它们的相对位置决定的分子势能跟物体的体积有关系，因此，一般说来物体的内能跟它的温度和体积都有关系，包括固体、液体和实际气体都是这样。对于理想气体来说，由于分子间及分子与容器壁间除弹性碰撞时外假定没有相互作用，因此就不存在分子势能。所以理想气体的内能就是气体所有分子热运动的动能的总和，因而理想气体的内能只跟温度有关，跟体积无关。

**物体内能的变化** 当物体同外界发生能量交换而由一种（热力学）状态变为另一种不同（热力学）状态时，过程中将发生物体内能的变化。能够改变物体内能的物理过程有两种，即做功和热传递。只要物体变化的始末状态确定，不论通过怎样的转变途径，物体内能总是改变一定的数值。

例如一定质量的理想气体，从图所示的  $p - V$  图中看到，使它由状态 变为状态 ，可以经历不同的途径。譬如 先等温膨胀至 A 状态，再等容增压至 状态； 先等压膨胀至 B 状态，再等容降压至 状态；沿非等值变化的某一变化过程。气体温度均由  $T_1$  变为  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ )，所以它的内能总是增加同一个数值。

**热量** 热传递过程中物体之间传递的能量。热量与过程相联系，即吸热或放热必在某一过程中进行。物体处于某一状态时不能说它含有多少热量。

物体（质量  $m$ ）经某一过程温度由  $T_1$  变化为  $T_2$ ，它吸收（或放出）的热量

$$Q = cm \cdot T$$

其中  $c$  是与这个过程相关的比热（容）。（譬如对同一种气体为说，有定压比热和定容比热之分，它们分别对应于气体的等压变化和等容变化过程。在中学物理中一般不涉及。）

热量的单位与功、能量的单位相同，在国际单位制中热量的单位为焦耳（简称焦，符号为  $J$ ）。历史上曾定义热量单位为卡，目前只作为能量的辅助单位， $1 \text{ 卡} = 4.18 \text{ 焦}$ 。

**热的本质** 热是物质运动的一种表现，即构成物质系统的大量微观粒子无规则运动的宏观表现。就其中单个粒子而言，它的无规则运动具有极大的偶然性；而整个物质系统所显现的宏观性质（例如温度的高低、气体压强的大小等等）则是所有微观粒子的集体行为，存在着确切的规律性，这是物质的热运动有别于其他运动形式的基本特征。物质的热运动和其他运动形式（机械运动、电磁运动等等）之间可以相互转换，在转换过程中能量守恒（而不是“热质”的流动），与机械能、电磁能等相互转换的是由物质系统内部状态所决定的内能。如果能量的转换或传递过程通过传热方式，那么被传递的能量就叫做热量，但这绝不是“热质”，而是由于系统与外界间或同一系统的不同部分之间存在温度差而发生传热时被传递的能量。

**热传递** 是改变物体内能的方式之一，单一的热传递是在没有做功而存在温度差的条件下，内能从一个物体转移到另外的物体，或从物体的一部分转移到其他部分的过程。热传递又分对流、传导和辐射三种方式，在实际过程中常常同时出现。

**对流**：液体或气体依靠其宏观流动而实现的热传递过程。其中自然对流是由流体中各种温度不均匀引起压强或密度的差异而形成。对流的特点是在热传递的同时伴随着大量物质的定向循环运动，在循环中温度趋于均匀。这是液体和气体中热传递的主要方式。

**传导**：是靠大量分子、原子和电子之间的相互碰撞作用，使热量由高温物体（或物体的高温部分）传向低温物体（或物体的低温部分）的热传递过程。是固体中热传递的主要方式，在液体和气体中往往与对流同时发生。不同物质的热传导性能用在单位时间内流过单位横截面的热量进行比较。

**辐射**：是借助电磁波传递能量的方式。它能把热量以光速穿过真空从一个物体传给其他物体。这种传递过程不是单方面而是物体间相交换的，但其结果总是热量从高温物体传给低温物体。物体温度越高、表面越黑暗、粗糙，发射能量的本领就越强。而且辐射的波长分布情况也随温度而变，在温度较低时主要是不可见的红外辐射，在  $500^\circ\text{C}$  以上以至更高时，逐渐出现较强的可见光直至紫外辐射，但热辐射主要靠波长较长的红外线、远红外线以至微波。

**做功可以改变物体的内能** 在绝热条件下，通过实验定量研究外界对物体系统做功使系统的状态发生变化（譬如焦耳所做的一系列有关实验）。经大量实验结果发现，不论通过哪种绝热做功过程（如克服摩擦力做功、在非弹性碰撞中做功、气体被压缩或膨胀时做功等等）使系统由原来的某一平衡态都变为另一平衡态，外界对系统所做功的值都相等，即所做功的值只跟系统的首末状态有关而跟中间过程无关。由于物体系统的内能只由它内部状态所决定，因此，在绝热条件下，以不同

方式对系统做同样量值的功，都能够导致系统内能发生同样数值的变化。焦耳的热功当量实验表明，做功和热传递之间有着确定的当量关系，在导致物体系统内能变化过程中，二者是等效的。

当仅以做功方式使物体内能发生变化时，内能的变化就用“功”量度。外界对物体做多少功，物体内能就增加多少；物体对外界做多少功，物体内能就减少多少。

当仅以热传递方式使物体内能发生变化时，内能的变化就用“热量”量度。外界传递给物体多少热量，物体内能就增加多少；物体传递给外界多少热量，物体的内能就减少多少。

**做功使物体内能变化的解题思路** 通过下述例题分析说明。

质量  $m=20$  克的铜质子弹以  $v=100$  米/秒的水平速度射向一个质量  $M=480$  克、静止在光滑水平面上的木块，子弹陷入木块的深度  $l=10.0$  厘米后，二者以同一速度向前运动。在这过程中，如果产生热量的五分之四被子弹吸收，试求子弹所受阻力的大小和它升高的温度。[铜比热  $c=3.9 \times 10^2$  焦/(千克· )]

解题思路：在应用动量守恒定律求出子弹和木块共同速度  $V$  后，解题的关键是要确定摩擦阻力对子弹木块系统做功使它们内能增加的数量。根据动能定理，摩擦力  $f$  对系统所做的总功等于系统动能的增量。

即  $W_f = \frac{1}{2}(m+M)V^2 - \frac{1}{2}mv^2$ ，其中  $W_f = -f \cdot s$ ， $s$  是子弹对木块的相对位移，即陷入的深度  $l$ 。因此，题设过程产生的热量

$$Q = fl = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}(m+M)V^2 .$$

解： $mv = (m+M)V$ ，

共同运动速度  $V = \frac{m}{m+M}v$ 。代入数据得  $V = 4$  米/秒。系统产生

产热量  $Q = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}(m+M)v^2$ 。

代入数据得  $Q=96$  焦。

因此，子弹所受阻力  $f = \frac{-W_f}{l} = \frac{Q}{l}$ ，计算得  $f = 960$  牛。

由于  $\frac{4}{5}Q = cm \cdot t$ ，

所以子弹的温升  $t = \frac{\frac{4}{5}Q}{cm}$ ，计算得  $t = 9.8$ 。

**焦耳热功当量实验** 从 19 世纪中叶起英国物理学家焦耳所做的一系列证明能的转化和守恒定律的基础性实验，焦耳从 1840 年起持续几十年时间，用电量热法和机械量热法，做了大量实验，得出结论：热功当量是一个普适常数，同做功方式无关，从而证明了机械能（功）和电能（功）同热量之间的等效转换关系；论证了传热是能量传递的一种形式；为确认能的转化和守恒定律的正确性打下了坚实的实验基础。

1840 年焦耳用电量热法根据实验结果提出焦耳定律：电流通过导体产生的热量，跟电流强度的平方、导体的电阻和通电时间成正比。确定

了通电产生的热量  $Q$  同电流所做功  $W$  间的比例关系，即  $W = JQ$ ，或  $I^2RT = JQ$  并定出了热功当量  $J$ ， $J = \frac{W}{Q} = \frac{I^2RT}{Q}$ 。

1845 年焦耳进一步用机械量热法来测定热功当量。当时测定的结果相当于 1 卡 = 4.157 焦。目前国际公认的热功当量精确值是

$$J = 4.1868 \text{ 焦/卡 (国际蒸气表卡)} \\ = 4.1840 \text{ 焦/卡 (热化学卡)}$$

现在，国际单位制中已经规定热量的单位为焦耳，卡暂时仍作为同焦耳并用的单位。热功当量这个词也将逐渐被废除，但焦耳热功当量实验的历史意义，将是永存的。

**热力学第一定律** 是热力学基本定律之一，能的转化和守恒定律在一切涉及热现象的宏观过程中的具体形式。当物体系统由状态 经某一过程到达状态 时，它相应的内能  $E$  的改变应满足：

$$W + Q = E_2 - E_1, \text{ 或 } W + Q = \Delta E。$$

其中， $W$  为在状态变化过程中外界对物体系统所做的功， $Q$  为在同一过程中物体系统从外界吸收的热量。这就是热力学第一定律的数学表述，它表示了功、热量和内能之间的转化关系。在应用中应明确：当外界对物体系统做正功时，确定  $W > 0$  为正值，则若  $W < 0$  为负值时，应表示是外界对系统做负功，即系统对外界做功；同理，当物体系统从外界吸收热量时，确定  $Q > 0$  为正值，则若  $Q < 0$  为负值时，应表示是系统向外界放出热量。显然，过程中物体系统的内能是增加（ $\Delta E > 0$ ）还是减少（ $\Delta E < 0$ ），取决于  $W$  与  $Q$  的取值及其总和的正、负。

从能的转化角度考察热力学第一定律。由于功是能的转化的量度，做功使物体系统内能发生变化时，其它形式的能（如机械能、电能等）和内能发生相互转化；热传递使内能发生变化时，只是内能在外界物体与本系统之间的转移，而没有能量形式的转化。定律表示，做功和热传递提供给一个物体系统多少能量，系统的内能就增加多少，能量在转化或转移中守恒。

由于物体的内能是由它系统内部状态所决定，所以热力学第一定律的数学表达式适用于初、末状态确定的任一过程（参见“理想气体的内能及其变化”）。

当物体系统经过某一循环过程又回到初始状态时，系统内能的改变量应为零，因此

$$W + Q = 0, \text{ 或 } Q = -W。$$

说明在这一循环过程中系统对外界所做的功等于系统从外界吸收的热量。如果系统既没有从外界吸收热量，内能又没发生变化，那么必定有系统对外不做功的结论。

**能的转化和守恒定律** 又称能量守恒和转换定律，是自然科学中关于物质运动的最重要的普遍定律之一。它可表述为：物质的任何一种运动形式，如机械、热、电磁、光、化学等，在一定条件下都能够而且必然地以直接或间接的方式，转化为其他的任何运动形式，在转化前后，作为物质运动的一种量度的能量，恒保持不变。在中学物理教科书中将定律的表述归纳为：能量既不能凭空产生，也不能凭空消失，它只能从

一种形式转化为别的形式，或者从一个物体转移到别的物体。

能的转化和守恒定律是建立在自然科学发展的基础上的。恩格斯曾把这一定律称为“伟大的运动基本定律，”他认为它是19世纪自然科学的三大发现之一（另外两个分别是细胞学说和达尔文的生物进化论）。后来又确认定律在微观世界仍然正确（1923年康普顿效应），在深入认识、理解定律的基础上知道，能的转化和守恒定律是物理学中的普遍定律。

**第一类永动机** 一种既不消耗能量，又可以对外做功的机器。根据热力学第一定律的数学表述  $W + Q = \Delta E$ ，当物体系统经过某一循环过程又回到初始状态时，系统内能的改变量应为零，即  $\Delta E = 0$ ，因此  $Q = -W$ 。这说明在这一循环过程中系统对外界所做的功等于系统从外界吸收的热量。如果系统既没有从外界吸收热量，内能又没发生变化，那么必定有系统对外不做功的必然结论。

在热力学第一定律确立之前，曾经有许多人千方百计、设计过不少方案力图制造第一类永动机，但一切这种努力都遭到彻底失败，这就从反面促进了能量转化和守恒定律——热力学第一定律的建立，因为任何幻想制造第一类永动机的企图都是违背能的转化和守恒定律——热力学第一定律的。因此，“第一类永动机是不可能造成的”这一从  $W + Q = \Delta E$  导出的必然结论就成为热力学第一定律的另一种表述。

**晶体** 原子（离子或分子）呈空间周期性和对称性排列的固体。有时晶体也可以从外形上来辨认。许多天然晶体有规则的多面体外形。例如岩盐的晶体是正立方体，明矾的晶体是八面体，石英的晶体中间是六面棱柱、两端是六面棱锥，方解石的晶体常呈偏三角面体及菱面体。但外形不一定是可靠的标志，也有不少晶体限于生长条件，使其规则晶面没有充分显露。因此鉴别晶体和非晶体的根本依据在于是否具有内在的周期性。

晶体可分为单晶体和多晶体，单晶体是一整块内部原子（离子或分子）沿空间三维方向都呈周期性整齐排列的固体。多晶体则是由许多取向不同的单晶体颗粒（晶粒）组成的固体，其中晶粒之间没有周期性的联系。平常见到的各种金属材料就是多晶体，在金相显微镜下可以见到组成的晶粒，线度为  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  厘米。

**晶体——单晶体和晶粒**——由于内在粒子排列的周期性而在宏观表现出各向异性，即晶体在不同方向上的物理性质（力学的、热学的、光学的、电学的等方面的性质）是不同的。对于多晶体来说，由于晶粒排列得杂乱无章，因此多晶体没有规则的天然多面体外形，也不显示各向异性，而从宏观上说是各向同性的。晶体在一定压强下吸热熔解时有确定的熔点。

**非晶体** 又称无定形或玻璃态材料，如玻璃、蜂蜡、松香、沥青、橡胶等。天然的非晶体没有规则的外形。其组成的原子、分子的空间排列不呈现周期性和对称性。

非晶体由于内在粒子排列的非周期性而在宏观表现出各向同性，即非晶体在不同方向上的物理性质（力、热、电、光等方面的性质）是相同的。

非晶体没有明显的熔点。当它的温度上升到某一范围时逐渐出现软

化，流动性增大，最后过渡为液体。所以有时也把非晶体看成过冷液体。严格地说，只有晶体才能叫做真正的固体。

**空间点阵** 一种表示晶体内部结构中质点排列规律性的几何图形。由一系列有规律地在三维空间成周期性重复排列的结点联接而成。结点在空间点阵中排列的规律性体现了晶体结构中原子（离子或分子）在空间分布的规律性。一个空间点阵总可以被三组相交的通过结点的平面将整个空间划分为一系列相同且相互平行叠置的平行六面体。在实际晶体结构中，与这些平行六面体相对应的单位称为“细胞”（即晶体内部结构中能够反映整个晶格对称性的基本构造单位）。

天然晶体外形的规则性可以用相对应的空间点阵体现的物质微粒的排列规则性来解释。同样，单晶体的各向异性也是由晶体中的内部结构决定，可以用相对应的空间点阵的排列情况来说明。

**液体的微观结构** 液体中的分子跟固体中的情况类似也是密集在一起的，因而液体具有一定的体积，不易被压缩。液体分子在很小的区域内作有规则的排列，这种区域是由分子暂时形成的，边界和大小随时改变，有时瓦解，有时又重新形成，液体由大量这种小区域构成，这种小区域杂乱无章地分布着，因而液体表现出各向同性。

液体分子间的距离小，相互作用力还很大，因此液体分子的热运动与固体的类似，主要表现为在平衡位置附近做微小的振动。跟固体不同的是，液体分子没有长期固定的平衡位置，在一个平衡位置附近振动一小段时间后，又转到另一个平衡位置附近去振动，即液体分子可以在液体中移动，这就是液体具有流动性的原因。

非晶体的微观结构跟液体非常类似，可以看作是粘滞性极大的液体。

**表面张力** 作用于液体表面上任一假想分界线的两侧、垂直于该分界线并与液面相切、能使液面具有收缩趋势的相互吸引的力。

表面张力是由于液体表面层内分子之间的相互作用不同于液体内部，从而使液体表面具有一种特殊性质的结果。研究表明，液体跟气体接触的表面形成一个跟液体内部不同的薄层——表面层，其中的分子要比液体内部稀疏些，即分子平均间距要比液体内部大些。液体分子间既有引力又有斥力，在液体内部一般可以认为它们的大小相等。而在表面层中由于分子间的距离较大，虽然引力和斥力都有所减小，但斥力减小得更多一些，所以表面层中的分子间的相互作用表现为引力。这就是表面张力产生的微观原因。表面张力使液面具有收缩的趋势。

如果液面上的假想分界线长为  $l$ ，这段分界线两侧液面之间的表面张力为  $f$ ，实验可知  $f \propto l$ ，或  $f = a l$  叫做表面张力系数，等于作用在液面单位长度分界线上的表面张力。表面张力系数的大小跟液体以及与液面相邻物质的性质有关，还与温度及液体中所含杂质有关。温度越高  $a$  值越小。一般来说分子间作用力大的液体  $a$  值大。液态金属的  $a$  值很大，而液态气体的则很小。例如在温度  $18^\circ\text{C}$  与空气接触的液面上，

$$a_{\text{酒精}} = 22.9 \times 10^{-3} \text{ 牛/米},$$

$$a_{\text{水}} = 73 \times 10^{-3} \text{ 牛/米},$$

$$a_{\text{汞}} = 490 \times 10^{-3} \text{ 牛/米}.$$

而对于—190 在液态空气来说，它的  $a$  值只有  $12 \times 10^{-3}$  牛/米。

**浸润现象和不浸润现象** 固体与液体接触时，如果液体与固体的接触面能扩大而相互附着的现象叫做浸润现象，如果接触面趋于缩小而不能附着，则称做不浸润现象。同一种液体，对一些固体来说是浸润的，而对另一些固定体说则是不浸润的。譬如，水能浸润玻璃，但不能浸润石蜡；水银虽不能浸润玻璃，但能浸润金属锌。

浸润和不浸润现象，也是分子力作用的表现。当液体跟固体接触时，形成一个跟固体接触的液体薄层，叫做附着层。附着层里的分子，一方面受到液体内部分子的作用，另一方面受到固体分子的作用。由于受到固体分子的作用，附着层里的分子的分布，比起表面层来，总是要密一些。

如果固体分子跟液体分子间的引力比较弱，那么，虽然附着层中分子的分布比表面层密，但仍然比液体内部稀疏。这样，在附着层中就出现了跟表面张力相似的收缩力，这时液体跟固体接触的面积就有缩小的趋势，形成了不浸润现象。如果固体分子跟液体分子间的引力相当强，那么，附着层中分子的分布就会比液体内部更密一些。这样，在附着层中就跟表面层中的情形相反，液体间出现了相互排斥的力，这时液体跟固体接触的面积就有扩大的趋势，形成了浸润现象。

**毛细现象** 浸润液体在内径很小的管子——毛细管中上升和不浸润液体在毛细管中下降，导致管内外液面产生高度差的现象。

浸润液体能在毛细管内上升的原因分析：将毛细管插入浸润液体中，由于浸润液体跟毛细管的内壁相接触的附着层里存在着排斥力，最初，这个排斥力使附着层里的液体沿管壁上升。由于这部分液体的上升引起了管内液面的弯曲（呈周高中低的凹形），使液体表面变大；而液面表面张力的收缩作用又要使液面面积减小，于是管内液体随着上升，以减小液面面积；就在附着层中的排斥力和表面层中的表面张力共同作用下，管内液柱不断升高。直到表面张力向上的拉引作用跟管内已升高的液柱所受重力相等时，管内液体才停止上升，达到平衡。这时管内液面下凹。如果液面刚好呈半球形弯月面，对于管内半径为  $r$  的毛细管、表面张力系数为  $a$ 、密度为  $p$  的液体来说，液柱上升的高度  $h$ （即管内外液面的高度差）应根据  $2 \pi r \alpha = p g r^2 h$

$$\text{得 } h = \frac{2\alpha}{\rho g r}$$

在其它条件相同的情况下，管径越小，液柱上升越高。

利用同样的分析，也可以说明不浸润液体在毛细管内下降的原因。如果管内液面上凸、刚好呈半球形弯月面时，管内液体下降的高度（即管内外液面的高度差）也同样应用上式计算。管径越小，液柱下降越深。

毛细现象在自然界、科学技术和日常生活中都有重要意义，要注意兴利除弊，认真对待。

**液晶** 介于各向同性液体与晶体之间的一种新的物质状态。液晶的特点是它一方面像液体，具有流动性；另一方面又像晶体，光学性质具有各向异性。1888年由奥地利植物学家赖尼策尔在胆甾醇苯酸酯中首先观察到。目前所知具有液晶特征的材料都是长形分子或盘形分子有机化合物（现已发现有几千种），可分为热致液晶和溶致液晶。前者在一定

温度范围内为液晶态，后者与温度也有一定程度的关系。

对于热致液晶来说，如果温度高于液晶态温度的上限，液晶就变成普通的透明液体，失去上述各向异性的光学性质，成为各向同性液；如果温度低于液晶态温度的下限，液晶就变成普通晶体，失去流动性。即使处于液晶态，也是不稳定的，外界影响的微小变动都会引起液晶分子排列的变化，改变它的光学性质。

有一种液晶，在外加电压的影响下，会由透明变成混浊状态，去掉电压，又恢复透明。利用这一性质，可制成显示元件。在两电极间将液晶涂成文字或数码，根据所加的适当电压显示文字或数码。可用于电子手表、电子计算器、微电脑以及其它仪器中。

还有一种液晶，具有灵敏的温度效应，温度改变时会改变颜色。只要温度升高，液晶就会按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序改变颜色；温度降低，又按相反顺序改变颜色。利用液晶的这种性质，可以用来探测温度。如在医学上利用液晶控制局部温度的差异以诊断病情，在电工中根据短路点温度高，可应用液晶检查线路中的短路点。近 20 年来，人们对液晶的研究有了重大进展，使它获得了广泛的应用。

**气体的平衡态** 指某一定量的气体作为一个热力学系统在不受外界影响的条件下，宏观性质不随时间变化的状态。通常称为热力学平衡态，简称平衡态。所说的不受外界影响是指系统和外界之间没有做功和热传递的相互作用；这种热力学平衡，是一种动态平衡，系统的宏观性质不随时间变化，但在微观上分子仍永不停息地做热运动，而分子热运动的平均效果不变；还应指出的是，对于在界定体积变化范围的一定质量气体说，当它处于平衡态时，通常是在忽略重力等因素对密度分布影响的情况下，我们才认为气体各部分的温度和压强等状态参量是处处相等、均匀一致的。

在中学物理中研究气体的热学性质时，对于一定质量的气体来说，凡能够用确定的体积、压强、温度等状态参量来描述气体状态的，都指的是气体处于平衡态。在  $p$ - $v$  或  $p$ - $t$  等函数图象中，图上一个点对应的就是气体的一个平衡态，用相应的一组  $P$ 、 $V$ 、 $t$  值来描述。非平衡态在这些图象中是无法表示的，虽然在中学物理中遇到的绝大多数问题只涉及平衡态，但在实际现象中，非平衡态是经常出现的，要学会全面分析、正确分辨。

**气体的过程** 指气体的状态不断随时间变化。可分为平衡过程和非平衡过程。所谓平衡过程是指在气体状态发生变化的每时每刻，气体的状态都非常接近于平衡态的变化过程。这种变化过程应是无限缓慢进行的（确切地说应叫做准静态过程）。在一般情况下，尽管中间不可避免地将出现一系列非平衡态（打破原来的平衡态经历非平衡态变为另一新的平衡态是状态变化的必然过程），但只要变化足够慢，就可以近似看作为平衡过程。平衡过程是一种理想变化过程。在中学物理中讨论气体状态变化时常常要强调要“缓慢进行”，这就认为这一状态变化过程是平衡过程。在  $p$ - $V$ 、 $p$ - $t$  等函数图象中，既然图上一个点对应的是气体的一个平衡态，那么由一系列点（即对应一系列平衡态）组成的图上的任何一条曲线都对应表示一个平衡过程。经常涉及到的等温、等容、等压以及绝热等图线反映的只是平衡过程中的几个具体情况，不能用它们

概括所有的平衡过程。至于非平衡过程，跟非平衡态一样，在上述这些图象中是无法表示的。虽然在中学物理中遇到的绝大多数问题只涉及平衡过程，但在实际现象中，非平衡过程是经常出现的，要学会全面分析、正确分辨。

**气体的体积** 气体分子可以自由移动，因而气体总要充满整个容器。气体的体积就是指气体所充满的容器的容积。也就是所论气体所含分子的体积和它们活动空间大小的总和。对于理想气体来说，它的分子被视为没有大小的质点，因此一定质量理想气体的体积就是它的所有分子活动空间的大小。在国际单位制中，体积的单位是米<sup>3</sup>。

**气体的压强** 气体作用在器壁单位面积上的压力。大量的气体分子频繁地碰撞器壁，就对器壁产生持续的均匀的压力，因此，气体对器壁的压强是大量分子的行为，即大量分子对器壁碰撞所产生的平均效果。用统计方法对理想气体的大量分子的上述行为进行分析、研究，得到理想气体的压强公式：

$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right)$$

式中 $n$ 为单位体积内气体的分子数， $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$ 是气体分子热运动的平均平动动能。公式说明理想气体对器壁的压强 $p$ 与单位体积内的分子数 $n$ 成正比，跟分子的平均动能 $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$ 成正比。

由于气体的密度 $\rho$ 正比于 $n$ ，气体的热力学温度 $T$ 正比于 $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$ ，因此气体的压强跟气体的密度成正比，跟气体的热力学温度成正比。

$$p \propto \rho \cdot T$$

从理想气体的克拉珀龙方程 $pV = \frac{m}{M} RT$ 可推导得 $p = \frac{R}{M} \frac{m}{V} T$ ，即 $p = \frac{R}{M} \rho T$ ，与上述结果一致。

气体压强这一宏观量反映的是大量气体分子与器壁碰撞所产生的平均效果，它和分子热运动的平均平动动能以及单位体积中的分子数的关系是一个统计性的规律，离开了“大量分子”和“统计平均”来谈气体压强是没有意义的。

在国际单位制中，压强的单位是帕斯卡（Pa）。1帕=1牛/米<sup>2</sup>。气体的压强还常用标准大气压和毫米汞柱作单位。1标准大气压=760毫米汞柱=1.013×10<sup>5</sup>帕，1毫米汞柱=133.3帕。

**气体压强的测定** 气体压强一般应用压强计根据平衡原理来测定。压强计种类很多，构造原理也不同。在工业上测量大的气压用金属压强计，而测量较小的气体压强常用液体压强计，其中以水银压强计最为普遍。将两端开口的U形管内装入水银后开口向上竖直放置，就构成一个开管的水银压强计，如图(1)(2)所示。将压强计的一个臂（图中A管）跟盛有被测气体的容器相连，当容器内的气体处于平衡态时，其中处处压强都相等，只要根据平衡原理测定A管内水银面上方气体对液面的压强即可。当U形管内水银柱在大气与被测气体的压力以及水银重力

的作用下经调整稳定后，其中每一段水银都将受力处于平衡状态。例如(1)图中两臂水银面间B管中的水银柱(高h)在大气压力 $p_0S$ (向下)、水银柱重力 $pghS$ (向下)及被测气体的压力 $pS$ (根据帕斯卡定律经水银传递压强后，压力向上)的共同作用下平衡，有

$$p_0S + pghS - pS = 0$$

因此

$$p = p_0 + pgh \quad (p > p_0)$$

同理，在(2)图中 $p = p_0 + pgh$  ( $p < p_0$ )

**气体的温度** 处于平衡态的气体，其中各部分的冷热程度处处相同，具有同一的温度。气体的温度仅由它本身内部热运动状态决定，反映气体的大量分子无规则热运动的剧烈程度，气体的热力学温度是气体分子热运动平均平动动能的量度。

根据理想气体的压强公式和状态方程，可以导出气体的温度与分子热运动的平均平动动能之间的关系。

质量为 $m$ 、摩尔质量 $M$ 的某种理想气体，它的状态方程—克拉珀龙方程为

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (1)$$

其中 $R$ 是摩尔气体恒量， $R = 8.31$  焦/(摩·开)。

理想气体的压强公式为

$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \quad (2)$$

其中 $n$ 是气体单位体积内的分子数， $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$ 是气体分子热运动的平均平动动能。

由于质量为 $m$ 的气体所含的分子数 $N = \frac{m}{M} N_A$  ( $N_A$ 是阿伏伽德罗常数， $N_A = 6.02 \times 10^{23}$  摩<sup>-1</sup>)，而且 $N = nV$ 。考虑到这些量的关系，将(1)、(2)两式消去压强 $p$ ，整理可得：

$$\frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T$$

式中用常数 $k$ 表示 $\frac{R}{N_A}$ ， $k$ 叫做玻尔兹曼常数，

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31 \text{ 焦 / (摩} \cdot \text{开)}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 摩}^{-1}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ 焦 / 开。}$$

并用 $\bar{\epsilon}$ 表示 $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$ ，即可有：

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT$$

这是一个重要的关系式，它表明：理想气体分子热运动的平均平动动能只与温度有关，且只跟热力学温度(绝对温度)成正比。由此得出“气体的热力学温度是气体分子热运动平均平动动能的量度”这一重要结论。

前已述及，只有对于单原子分子理想气体来说（譬如类似氦气、氖气等），气体分子热运动的平均总动能为 $\frac{3}{2}kT$ ，才可以说热力学温度是这种气体分子热运动的平均动能的量度。

在国际单位制中，采用热力学温标（又常称作绝对温标）。热力学温度跟摄氏温度间的关系为

$$T=t+273.15,$$

可简化为

$$T=t+273$$

就每一度的大小来说，热力学温度变化1开(1K)和摄氏温度1摄氏度(1)相同。

**玻意耳-马略特定律** 一定质量的气体，在保持温度不变时，它的压强 $p$ 和体积 $V$ 成反比（或：它的压强 $p$ 与体积 $V$ 的乘积不变。）数学表达式为

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad p_1V_1 = p_2V_2 = \dots = \text{恒量}$$

该恒量的值取决于气体的摩尔数及其温度。

本定律是气体实验定律之一。由英国物理学家、化学家玻意耳(1627~1691)和法国物理学家马略特(1620~1684)分别在1662年和1676年各自根据实验发现的。

在常温、常压下，定律与实际情况符合较好。在这种条件下，不论什么气体都近似地符合这个定律。但压强越大、温度越低，定律偏离实际情况就越明显。它只能近似地反映实际气体的等温变化规律。譬如，有一定质量的氦气，压强为1标准大气压时体积为1米<sup>3</sup>。当压强增至500标准大气压时，实测体积为 $\frac{1.36}{500}$ 米<sup>3</sup>（而不是 $\frac{1}{500}$ 米<sup>3</sup>）；已明显出现与定律结果的差别；而当压强增至1000标准大气压时，实测体积为 $\frac{2.0685}{1000}$ 米<sup>3</sup>（而不是 $\frac{1}{1000}$ 米<sup>3</sup>），与定律结果相差1倍多，根本无法应用玻意耳-马略特定律了。

**气体的等温变化图象** 在压强-体积函数图象（即 $p$ - $V$ 图）压强-温度函数图象（即 $p$ - $T$ 图）以及体积-温度函数图象（即 $V$ - $T$ 图）上画出的一定质量气体温度保持不变的状态变化图线（即等温线）。

在 $P$ - $V$ 图中：根据玻意耳-马略特定律，由于 $pV$ =恒量，而且 $p$ 与 $V$ 都只能取正值，所以等温线为以 $+V$ 轴、 $+p$ 轴为渐近线、在第一象限中的一簇双曲线。对于摩尔数相同的气体来说，温度越高，等温线距坐标原点越远。如图(1)所示。

在 $P$ - $T$ 图中：由于温度（热力学温度 $T$ ）保持不变，而且 $p$ 、 $T$ 都只能取正值，所以等温线为在第一象限中与 $+p$ 轴平行的一簇平行直线。对于摩尔数相同的气体来说，温度越高，等温线距坐标原点越远。如图(2)所示。

在 $V$ - $T$ 图中：由于温度（热力学温度 $T$ ）保持下变，而且 $V$ 、 $T$ 都只能取正值，所以等温线为在第一象限中与 $+V$ 轴平行的一簇平行直线。对于摩尔数相同的气体说，温度越高，等温线距坐标原点越远。如图(3)所示。

**查理定律** 一定质量的气体，在保持体积不变时，温度每升高（或降低）1℃，增加（或减小）的压强等于它在0℃时压强的 $\frac{1}{273}$ 。数学表达式为

$$p_t = p_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right)$$

利用热力学温标可以使查理定律的表述简化为：一定质量的气体，在保持体积不变时，它的压强P跟热力学温度T成正比。数学表达式为

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = \dots = \text{恒量}$$

该恒量的值取决于气体的摩尔数及其体积。

本定律是气体实验定律之一。由法国物理学家查理(1746~1823)在1787年通过实验发现的。

在常温、常压下，定律与实际情况符合较好。在这种条件下，不论什么气体都近似地符合这个定律。但压强越大、温度越低，定律偏离实际情况就越明显。它只能近似地反映实际气体的等容变化规律。当压强很大、温度很低时，不仅每升高1℃增加的压强不再等于0℃时压强的 $\frac{1}{273}$ ，而且这个数值对不同的气体也不再相同。实际上，在温度下降到绝对零度之前，任何气体都已液化甚至变为固态，关于气体的查理定律早已不适用了。

**气体的等容变化图象** 在压强-温度函数图象（即p-t(1)图或p-T图）、压强-体积函数图象（即p-V图）以及体积-温度函数图象（即V-T图）上画出的一定质量气体体积保持不变的状态变化图线（即等容线）。

在p-t图中：根据查理定律，由于 $p_t = p_0 + \frac{p_0}{273} t$ ， $p_t$ 是t（℃）的一次函数，图线为纵截距为 $p_0$ 、斜率为 $\frac{p_0}{273}$ 的直线，延伸后与横轴的交点为-273℃。对于摩尔数相同的气体来说，体积越大， $p_0$ 及 $\frac{p_0}{273}$ 值越小，但等容线与横轴的交点仍为-273℃。如图(1)所示。

在p-T图中：由于T(K)与t(℃)的关系是 $T = t + 273$ ，由定律可导出 $p_T = \frac{p_0}{273} T$ 。可知 $p_T$ 是T的正比函数，图线斜率仍为 $\frac{p_0}{273}$ 。将图(1)的p-t图象横轴原点改在-273℃处，即可得到在p-T图中的等容线。如图(2)所示。

在P-V图中：由于体积保持不变，而且p、V都只能取正值，所以等容线为在第一象限中与+p轴平行的一簇平行直线。对于摩尔数相同的气体来说，体积越大，等容线距坐标原点越远。如图(3)所示。

在V-T图中：由于体积保持不变，而且V、T都只能取正值，所以等容线为在第一象限中与T轴平行的一簇平行直线。对于摩尔数相同的气体来说，体积越大，等容线距坐标原点越远。如图(4)所示。

**热力学温标** 根据热力学第二定律定义的一种温标，曾称为开氏温标或绝对温标。它摆脱了各种经验温标（如摄氏温标等）的缺点，不依

赖于某种特定的测温物质，使温度测量真正具有了科学意义。由热力学温标所定义的温度称为热力学温度。1848年热力学温标由英国物理学家开尔文提出，1954年国际计量大会确定了这一标准温标，规定了热力学温度单位的定义。在国际单位制中热力学温度单位开尔文(K)是温度的基本单位。1开尔文是水三相点——热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ (1967年国际计量大会)。理论证明，理想气体温标和热力学温标是等同的。因此，应用气体温度计(譬如根据查理定律原理的定容气体温度计)经修正就可以获得热力学温度。

除开尔文表示的热力学温度(T)外，也使用由式 $t = T - 273.15\text{K}$ 定义的摄氏温度(t)，即热力学摄氏温度。273.15K是水的冰点的热力学温度。它与水三相点的热力学温度相差0.01K。摄氏温度用摄氏度( )表示。因比，“摄氏度”这个单位与单位“开尔文”相等。

**盖·吕萨克定律** 一定质量的气体，在保持压强不变时，温度每升高(或降低)1，增加(或减小)的体积等于它在0时体积的

$\frac{1}{273}$ 。数学表达式为

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right)$$

利用热力学温标可以使盖·吕萨克定律的表述简化为：一定质量的气体，在保持压强不变时，它的体积V跟热力学温度T成正比。数学表达式为

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots = \text{恒量。}$$

该恒量的值取决于气体的摩尔数及其压强。

本定律是气体实验定律之一。由法国化学家、物理学家盖·吕萨克(1778~1850)在1802年研究气体热膨胀时得到的实验规律。

在常温、常压下，定律与实际情况符合较好。在这种条件下，不论什么气体都近似地符合这个定律。但压强越大、温度越低，定律偏离实际情况就越明显。它只能近似地反映实际气体的等压变化规律。

**气体的等压变化图象** 在体积-温度函数图象(即V-t图或V-T图)压强-体积函数图象(即p-V图)以及压强-温度函数图象(即p-T图)画出的一定质量气体压强保持不变的状态变化图线(即等压线)。

在V-t图中：根据盖·吕萨克定律，由于 $V_t = V_0 + \frac{V_0}{273} t$ ， $V_t$ 是t

( )的一次函数，图线的纵截距为 $V_0$ 、斜率为 $\frac{V_0}{273}$ 的直线，延伸后与横轴的交点为-273。对于摩尔数相同的气体来说，压强越大， $V_0$ 及

$\frac{V_0}{273}$ 值越小，但等压线与横轴的交点仍为-273。如图(1)所示。在V

-T图中：由于T(K)与t(C)的关系是 $T = t + 273$ ，由定律可导

出 $V_T = \frac{V_0}{273} T$ 。可知 $V_T$ 是T的正比函数，图线斜率仍为 $\frac{V_0}{273}$ 。将图(1)的

V-t图象横轴原点改在-273处，即可得到在V-T图中的等压线。如图

(2)所示。

在  $p$ - $V$  图中：由于压强保持不变，而且  $p$ 、 $V$  都只能取正值，所以等压线为在第一象限中与  $+V$  轴平行的一簇平行直线。对于摩尔数相同的气体来说，压强越大，等压线距坐标原点越远。如图(3)所示。

在  $p$ - $T$  图中：由于压强保持不变，而且  $p$ 、 $T$  都只能取正值，所以等压线为在第一象限内与  $T$  轴平行的一簇平行直线。对于摩尔数相同的气体来说，压强越大，等压线距坐标原点越远。如图(4)所示。

**理想气体** 又称完全气体。是一种假想的气体，即实际气体的理想模型。从宏观角度看，理想气体是能够在任何温度和压强下都严格遵守玻意耳-马略特定律、查理定律和盖·吕萨克定律这三条气体实验定律，即严格遵守状态方程  $pV = \frac{m}{M}RT$  的气体。从微观角度看，理想气体是

分子体积与分子间平均距离相比可忽略不计，即视分子为没有大小的质点；在分子间及分子与容器壁之间，除发生碰撞——弹性碰撞——外，没有相互作用的气体。因此，理想气体的内能就是气体系统所有分子热运动动能的总和，而不存在分子势能。所以理想气体系统的内能只跟温度有关，跟体积无关。

当实际气体的温度足够高、压强足够小时，由于密度很小气体稀薄分子间距离相当大，这种条件下的实际气体就接近于理想气体。在中学物理中，对于在常温、常压下高于临界温度的实际气体，一般都作为理想气体看待。理想气体是对实际气体的简化，是应用理想模型研究复杂客观过程这一重要物理方法在气体性质方面的具体体现。

**理想气体状态方程** 描述理想气体处于平衡态时的状态参量之间的相互关系以及经历状态变化时各平衡态状态参量间相互关系的方程。对于一定质量的理想气体来说，即用以描述气体温度  $T$  与压强  $p$  和体积  $V$  之间函数关系的方程。根据玻意耳-马略特定律、查理定律等气体实验定律，应用热力学温标，可以导出一定质量理想气体的状态方程

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{或} \quad \frac{pV}{T} = \text{恒量。}$$

该恒量的值取决于气体的摩尔数。对于 1 摩尔任何气体来说，在标准状态下（即  $p_0=1$  标准大气  $=1.013 \times 10^5$  帕、 $T_0=273$  开）占有的体积  $V_0$  都是  $22.4 \times 10^{-3}$  米<sup>3</sup>（根据阿伏伽德罗定律）。结合上述方程可导出任意质量的理想气体的状态方程——克拉珀龙方程：

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

其中  $m$ （千克）为摩尔质量是  $M$ （千克/摩）的某种理想气体的质量， $R$  为一对任何气体都适用的恒量——摩尔气体恒量， $R=8.31$  焦/（摩·开）。

利用气体密度  $\rho = \frac{m}{V}$ ，有时将上述气态方程改写为  $\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2}$  和

$$p = \frac{R}{M} \rho T, \quad \text{以便于涉及密度时的应用。}$$

理想气体状态方程对于温度不太低，压强不太大的实际气体都适用。尤其是克拉珀龙方程在实际中有广泛的应用，可以用来解决许多有关气体状态变化的问题。

摩尔气体恒量  $R$  是热学中的一个重要常数。可根据阿伏伽德罗定律导出。

在标准状态下 (即气压  $p_0=1.01325 \times 10^5$  帕, 温度  $T_0=273.15$  开) 1 摩尔理想气体所占有的体积  $V_0=22.4183 \times 10^{-3}$  米<sup>3</sup>。将数据代入  $R=$

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} \text{ 得}$$

$$R=8.31441 \text{ 焦 / (摩} \cdot \text{开)}。$$

一般计算可用  $R=8.31$  焦/(摩 · 开)。[也可用  $R=0.82$  标准大气压 · 升 / (摩 · 开)]

摩尔气体恒量  $R$  不仅应用于克拉珀龙方程中,  $R$  与阿伏伽德罗常数  $N_A$  之比叫做玻尔兹曼常数  $k$  ( $k = \frac{R}{N_A}$ ) 曾在分析气体温度的微观本质时应用。这些都是热学中的重要常数。

**理想气体状态方程的解题思路** 首先要明确研究的对象是哪部分气体, 是否可以看作为理想气体, 气体系统的质量是否限定, 状态变化是否是平衡过程。

对于一定质量、并被视为理想气体的某种气体来说, 解题的关键是依题目提供的条件分析气体状态变化、确定变化的初、末状态以及需要的中间状态, 找出描述各个状态的每一个状态参量  $p$ 、 $V$ 、 $T$  等。特别要注意气体压强的分析, 一般应从力的平衡入手确定气体压力与外力的关系 (对于做变速运动的气体来说, 则要应用牛顿第二定律分析与气体相关的物体的运动规律确定气体压力与其它外力的关系)。然后将包含已知和未知诸量的两组状态参数 ( $p_1$ 、 $V_1$ 、 $T_1$  与  $p_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$ ) 统一单位后代入气态方程  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ , 解出最后结果。

对于虽被视为理想气体但题设过程可能有质量变化的某种气体来说, 除仍应用上述解题思路外可采用克拉珀龙方程解题较为方便。

计算时要注意各物理量的单位。T 必须采用热力学温度。根据  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$  解题时, 公式两边的  $p$  和  $V$  的单位必须统一。根据  $pV = \frac{m}{M} RT$  解题时,  $R$  的单位必须与  $p$ 、 $V$  的单位相适应。

在中学阶段, 解题中遇到的绝大多数有关气体状态和状态变化问题都属于平衡态和平衡过程, 但不排除个别例外, 要全面分析正确判断。

**应用克拉珀龙方程解题的思路** 如果题设的理想气体在状态变化过程中有质量的变化, 或可以根据几部分 (或几种) 气体的质量关系确定解题路线, 以及需要求解气体质量或密度等等涉及气体质量的问题时, 均可考虑应用克拉珀龙方程解题, 抓住气体质量的关系往往是解题关键。

**例** :位于海面下 200 米处的潜水艇上有一个容积 2 米<sup>3</sup> 贮有压缩空气的钢筒, 将筒内一部分空气压入有排水孔与海水相通的水箱, 排出海水 10 米<sup>3</sup>。这时钢筒内剩余气体的压强是 95 个大气压。设在上述过程中保持温度不变, 求贮气钢筒内原来的压缩空气的压强。(取 1 个大气压  $p_0=1.0 \times 10^5$  帕,  $g=10$  米/秒<sup>2</sup>, 海水密度  $\rho=1.0 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>)

解题思路：解法之一是根据题设状态变化先后气体质量的相互关系，应用克拉珀龙方程建立已知量与所求气体压强之间的联系。

解：设钢筒内原来气体的质量为  $m$ ，体积为  $V=2$  米<sup>3</sup>，压强为  $p$ 。排水后水箱中气体质量为  $m_1$ ，体积为  $V_1=10$  米<sup>3</sup> 压强为  $p_1$ ；钢筒内剩余气体质量为  $m_2$ ，体积  $V_2=V=2$  米<sup>3</sup>，压强  $p_2=95$  大气压。温度均为  $T$ 。其中压强  $p_1 = \rho gh + p_0 = (10 \times 10^3 \times 10 \times 200 + 1.0 \times 10^5)$  帕  $= 2.1 \times 10^6$  帕  $= 21$  大气压。

由于  $m = m_1 + m_2$ ，根据克拉珀龙方程  $pV = \frac{m}{M} RT$ ，可得： $\frac{M p V}{R T} = \frac{M p_1 V_1}{R T} + \frac{M p_2 V_2}{R T}$ ，整理得  $pV = p_1 V_1 + p_2 V_2$ ， $p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V}$ 。代入数据解得

$$P=200 \text{ 大气压。}$$

应用理想气体状态方程解综合性问题 这种问题中常有与物体平衡等力学知识相联系的内容。解题时，一要根据题目要求选择好研究对象；二要结合寻求气体压强的需要，进行相关物体的受力分析。

例：如图所示，一个上下都与大气相通的直圆筒，内部横截面的面积  $S=0.01$  米<sup>2</sup>，中间用两个活塞 A 与 B 封住一定质量的理想气体，A、B 都可沿圆筒无摩擦地上、下滑动，但不漏气，A 的质量可不计。B 的质量为  $M$ ，并与一倔强系数  $k=5 \times 10^3$  牛/米的较长的弹簧相连。已知大气压强  $p_0=1 \times 10^5$  帕，平衡时两活塞间的距离  $l_0=0.6$  米。现用力压 A，使之缓慢向下移动一定距离后，保持平衡。此时，用于压 A 的力  $F=5 \times 10^2$  牛。求活塞 A 向下移的距离。（假定气体温度保持不变。）

解题思路：题中将气体的状态变化及气体、活塞、弹簧等的相互作用和受力平衡问题相互渗透结合在一起。首先要弄清题设的物理情景、相关物体的状态变化过程及其内在联系。在此基础上考虑研究对象的选定以及可能变换研究对象等问题。题中涉及到的物体有 A、B 两个活塞、被封闭的气体以及弹簧等。它们在发生题设的变化前后都分别处于平衡状态。即使是在向下压 A 的缓慢变化的过程中，也可把气体的经历视为平衡过程，活塞和弹簧也分别经历一系列平衡状态。它们在变化中各按各自不同的规律进行调整、联系、作用，但它们均与题中起主要作用的关键因素——被封气体的状态变化——密切相关。因此应首先选定被封闭的气体为研究对象。但同时还应看到，被封闭气体的等温压缩、活塞 B 在平衡状态的受力变化以及弹簧在外界压力作用下的形变导致弹力发生变化等这几个物理过程都是被它们之间力的相互作用这条主线贯穿在一起的。为了循这条主线抓住其间的内在联系，在解题中还要根据需要适时地变换研究对象——如始终处于平衡状态的活塞 B 及形变中的弹簧等，进行必要的受力分析，建立与被封闭气体力的作用关系，理顺思路，即可逐一解决。

解：设被封闭气体在等温压缩过程，活塞 A 向下移动距离为  $l$ ，活塞 B 向下移动距离为  $x$ ，根据玻意耳-马略特定律有

$$P_0 l_0 S = (P_0 + \frac{F}{S})(l_0 - l + x) S,$$

由于在这个过程中，弹簧增加的压缩量也就是 B 向下移动的距离  $x$ ，弹簧对 B 增加的弹力也就等于  $F$ ，因此根据胡克定律有

$$F=kx$$

将上面两式联立，消去  $x$ ，代入数据，即可得活塞 A 向下移动的距离  $l=0.3$  米。

**应用气体的 p-V 图、p-T (或 p-t) 图解题例 1：**一定质量的理想气体，处在某一初始状态。现在要使它的温度经过状态变化后回到初始状态的温度，用下列哪些过程可能实现？

- A. 先保持压强不变而使它的体积膨胀，接着保持体积不变而减少压强；
- B. 先保持压强不变而使它的体积减小，接着保持体积不变而减小压强；
- C. 先保持体积不变而增大压强，接着保持压强不变而使它的体积膨胀；
- D. 先保持体积不变而减小压强，接着保持压强不变而使它的体积膨胀。

分析：本题若用 p-V 图象 (或 p-T 图象、p-t 图象) 进行分析判定，形象直观、对比性强，能够迅速地得出正确结论。如图(1)所示，画出一条等温线，并将各选项的状态变化过程标入图中，可见，选项 A 和 D 是符合要求的。

**例 2：**有两个容积相等的容器，里面盛有同种气体，用一段水平玻璃管把它们连接起来。在玻璃管的正中央有一段水银柱，当一个容器中气体的温度是  $0^\circ\text{C}$ ，另一个容器中气体的温度是  $20^\circ\text{C}$  时，水银柱保持静止。如果使两容器中气体的温度都升高  $10^\circ\text{C}$ ，管中的水银柱会不会移动？如果移动的话，向哪个方向移动？

分析：一般解法是，先假定两边密闭容器中的气体体积暂不改变，根据查理定律，分别计算出两边气体各升温  $10^\circ\text{C}$  后的压强，再比较两方压强的大小，就能判断水银柱会不会移动和向哪个方向移动。即对原来温度为  $0^\circ\text{C}$  的气体来说，

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad P_2 \frac{T_2}{T_1} P_1 = \frac{283}{273} P_0 = 1 \frac{10}{273} P_0;$$

对原来温度为  $20^\circ\text{C}$  的气体来说，

$$\frac{P_1'}{P_2'} = \frac{T_1'}{T_2'}, \quad P_2' = \frac{T_2'}{T_1'} P_1' = \frac{303}{293} P_0 = 1 \frac{10}{293} P_0。$$

由于原来两方压强  $p_1=p_2=P_0$ ，所以升温后  $P_2>P_2'$ ，因此水银柱应向原来温度高的那一侧移动。

这种解法如改用 P-T (或 p-t) 图象来表述，将会更直观、鲜明。解题思路跟上面的一样，即先假定两边密闭容器中的气体体积暂不改变，分别根据查理定律在 p-T 图上画出各自的等容线。如图(2)所示。其中在分别为  $273\text{K}$  和  $293\text{K}$  的初温时气体压强相等即  $p_0$ 。再标出温度各自升高  $10\text{K}(10^\circ\text{C})$  后的压强值  $p_2$  与  $p_2'$ ，并与  $p_0$  比较标明两侧压强的变化量  $\Delta p$  与  $\Delta p'$ 。显然从图中可以看出，由于两条等容线的斜率不等，致使在相等的温度增量的情况下，压强的增量不等， $\Delta p > \Delta p'$ 。因此应有  $p_2 > p_2'$ 。

$(=p_0 + p) > p_2$  ( $=p_0 + p$ ) 的结论。即水银柱应向原来温度较高的那一侧移动。

**气体分子运动的特点** 在常温、常压下，气体分子之间的平均距离比液体及固体的约大一个数量级。因此，对于实际气体来说，虽然分子之间在不碰撞时也有相互吸引作用，但作用力非常弱，分子在两次碰撞之间基本上可以自由地匀速运动。所以气体能充满它所能达到的空间，它既没有一定的体积，也没有一定的形状。

在常温、常压下，虽然气体中的分子分布远比液体或固体稀疏，但每厘米<sup>3</sup>气体中仍含有数千亿亿个分子。大量分子永不停息地运动，分子间必定不断地发生碰撞，1秒种内一个气体分子与其他气体分子的碰撞竟可达几十亿次！使得每个分子的速度大小和方向频繁地改变，造成气体分子做杂乱无章的热运动。

虽然气体分子做无规则的热运动，但对大量分子整体来说，分子的运动却表现出一定的规律。在分子运动方向方面，正是因为大量分子在碰撞中（包括分子间和分子与器壁间）的运动状况十分混乱，因此在同一时刻向任一方向运动的分子都有，可以认为在任一时刻分子沿各方向运动的机会均等。也就是说，沿任一取向的等大的截面范围内在同一时间间隔内通过的热运动分子数应是相等的。这里所说的“数目相等”是对大量分子用统计方法得到的一个统计平均数。分子数越多，所得结果跟实际情况符合得越好。

在分子运动速率大小的分布方面也表现出统计的规律。研究表明，对于大量气体分子所做的热运动来说，有的快，有的慢，但在某一时刻，其中的大多数分子的速率都在某个数值附近，离开这个数值越远，分子数越少，形成“中间多（中等速率区间的分子数所占有比例最大），两头少（速率很大和很小的区间分子数所占比例都很小）”的渐变的分布规律。而且随着温度的升高，分布的统计规律虽然不变，但是与分子数所占有比例最大的速率区间却移向速率大的一方。或者说，所有分子的速率的平均值随温度的升高而加大，说明温度越高，分子的热运动越激烈。

**气体分子速率的分布规律** 气体在宏观上处于平衡态时，虽然单个分子的速率一般都不相同，并且由于相互碰撞而不断发生变化，但平均说来，速率在某一范围内的分子数占有总分子数的百分比总是一定的，这个比值只与气体的种类及温度有关。英国物理学家麦克斯韦于1859年应用统计概念首先导出：气体处于平衡时，气体分子的数目按速率分布的规律。

按照麦克斯韦的分子速率分布函数，对氧气在0 和100 时分子速率的分布情况画出分布函数曲线，如图所示。

从图中可看到，在0 时速率在300~400米/秒这一速率区间的分子数最多，占有总分子数的21.4%；速率大于400米/秒和小于300米/秒的分子数依次递减，速率很大的（900米/秒以上的只占有0.9%）和很小的（100米/秒以下的只占1.4%）分子都很小。形成“中间多，两头少”的统计分布规律。温度升高到100 时，虽然这种分布规律不变，但与分子数所占比例最大值（18.6%）相对应的速率区间却移向速率大的一方，出现在400~500米/秒区间。这说明，温度升高时，速率小的分子数减少

(如 100 米/秒以下的由 1.4%降为 0.7%)，而速率大的分子数增多(如 900 米/秒以上的由 0.9%增为 3.9%)。显然，这种分子速率的分布规律是一种统计规律。上述的各速率区间的相对分子数  $\frac{N}{N}$ ，也是对大量分子用统计方法得到的统计平均数。但只要气体的种类固定不变，在同一温度下就会有确定的分子速率分布。

既然在一定温度下，某种气体的分子速率分布是确定的，就可以求出在这个温度下这种气体分子的平均速率，即所有分子的速率的平均。从麦克斯韦速率分布函数出发，可以求出气体分子的平均速率， $\bar{v}$ ：

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \text{ 或 } \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \left( k = \frac{R}{N_A}, m = \frac{M}{N_A} \right)$$

或中 R 是摩尔气体恒量，M 是某种气体的摩尔质量；k 是玻尔兹曼常数，m 是某种气体单个分子的质量。由上式可知，分子平均速率  $\bar{v} \propto \sqrt{T}$ ，这是由于温度升高时，速率大的分子数增加，因而分子的平均速率增大。

**气体压强的微观解释** 大量的气体分子频繁地碰撞器壁，就对器壁产生持续均匀的压力，气体对器壁的压强就等于器壁单位面积上所受到的这种压力。显然，气体对器壁的压强是大量分子对器壁碰撞所产生的平均效果。因此应着眼于大量分子，用统计方法揭示气体压强这一宏观量的微观实质。

设想有一个边长均为 l 的正立方体形容器，其中盛有可视为理想气体的某种气体，单个分子的质量为 m，分子总数为 N。由于大量气体分子做无规则热运动，处于平衡态的气体中这些数目巨大的分子沿各个方向运动的机会是均等的。因此在大量分子的频繁碰撞下，容器中每面器壁上气体对它的压强大小也应是相的。所以要计算气体压强，只考虑容器的六个面中任何一个器壁面(面积为  $l^2$ )所受压力即可。如图所示，建立坐标系。分析与 X 轴垂直的器壁  $S_1$  面所受压力。

先观察一个速度为 v 的分子，v 在 X、Y、Z 轴方向上的分量分别为  $v_x$ 、 $v_y$  和  $v_z$ 。一般视分子与器壁的碰撞是完全弹性碰撞，而且仅在碰撞时分子与器壁间才有相互作用。当该分子与面  $S_1$  碰撞时，将受到  $S_1$  面对它的一个沿 -X 方向的作用力，致使该分子在 X 轴方向上的动量由  $mv_x$  变为  $-mv_x$ ，即 X 轴方向上动量的增量为  $(-mv_x) - mv_x = -2mv_x$ 。根据动量定理， $S_1$  面对分子的冲量等于  $-2mv_x$ 。因此器壁  $S_1$  同时受到分子对它的一个等值反向的冲量，冲力方向沿 +X 轴方向，作用是短暂的。可以设想该分子从  $S_1$  面反弹后飞向对面器壁  $S_2$ ，碰撞后又飞回  $S_1$  面发生第二次碰撞。在与  $S_1$  面先后两次碰撞间，该分子在 X 轴方向上通过的距离为  $2l$ ，所需时间为  $2l/v_x$ ，即每隔时间  $2l/v_x$  该分子碰撞  $S_1$  面一次。因此它在单位时间内与  $S_1$  面的碰撞次数为  $v_x/2l$ 。上述仅是一个分子对器壁一个面的作用情况。对于容器有巨大数量的 N 个分子来说，它们对  $S_1$  面接连不断反复的碰撞形成的对  $S_1$  面的作用力，完全可视为连续的。该力大小应等于单位时间内全部分子对  $S_1$  面的总冲量，即等于单位时间内全部分子跟  $S_1$  面碰撞所引起的动量增量总和的负值：

$$F = 2mv_{1x} \frac{v_{1x}}{2l} + 2mv_{2x} \frac{v_{2x}}{2l} + \dots + 2mv_{Nx} \frac{v_{Nx}}{2l}$$
。其中  $v_{1x}$ 、 $v_{2x}$ …… $v_{Nx}$  表示各个分子速度在 X 轴上的分量。因此可得  $S_1$  面受到的气体压强为：

$$p = \frac{F}{l^2} = \frac{m}{l^3} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2)$$
，可改写为
 
$$p = \frac{N_m}{l^3} = \frac{(v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2)}{N}$$

上式括弧内的量是分子沿X轴方向速度分量的平方的平均值，用  $\overline{v_x^2}$  表示。因为对于每个分子来说有

$$v_1^2 = v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2$$

$$v_2^2 = v_{2x}^2 + v_{2y}^2 + v_{2z}^2$$

$$v_N^2 = v_{Nx}^2 + v_{Ny}^2 + v_{Nz}^2$$

即可结合上述讨论推导出全部分子速度的平方的平均值

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

由于处于平衡态的气体，大量分子沿各个方向运动的机会均等，因此可认为

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

由此，压强的前述关系式可改写为

$$p = \frac{N_m}{l^3} \cdot \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

设单位体积内气体的分子数为  $n$ ，即  $n = \frac{N}{l^3}$ ，则有：

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2}$$

或 
$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{1}{2} m \overline{v^2} \right)$$

这就是理想气体的压强公式。由式可知，理想气体对器壁的压强与单位体积内的分子数  $n$  成正比，跟分子的平均平动动能  $\frac{1}{2} m \overline{v^2}$  成正比。这个规律揭示了气体压强这一宏观量的微观实质。

要强调说明一点，气体压强是大量分子与器壁碰撞

---

因 为在常温、常压下，气体的密度大约比液体或固体的密度小三个数量级。譬如，将标准状态下 1000 升的空气经增压降温液化以后，只能得到大约 1.5 升的液态空气。

所产生的平均效果，它和 $n$ 与 $\frac{1}{2}\overline{mv^2}$ 的关系是一个统计性的规律。

因此气体压强 $p$ 和 $n$ 与 $\frac{1}{2}\overline{mv^2}$ 一样都是统计平均量，离开了“大量分子”和“统计平均”来谈气体压强是没有意义的。

**玻意耳-马略特定律的微观解释** 根据由气体分子运动论出发导出的气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \quad \text{或} \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right)$$

和气体温度的微观实质——气体的热力学温度是气体分子热运动平均平动动能的量度

$$\frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{3}{2} kT,$$

可作如下解释：一定质量的气体，温度保持不变，也就是分子的总数 $N$ 和分子的平均平动能 $\frac{1}{2}\overline{mv^2}$ 保持不变。在这种情况下，气体的体积减小到原来体积 $V$ 的几分之一，显然，单位体积内的分子数就增大原来 $n$ 的几倍，从压强公式可知，气体压强也就增大到原来 $p$ 的几倍。气体体积增大时，情况恰好相反。结果是气体的压强与体积成反比。

从气体压强公式可导出 $pV = \frac{2}{3} N \cdot \frac{1}{2} \overline{mv^2}$ ，其中气体分子总数 $N$ 与阿伏伽德罗常数 $N_A$ 之比就是所讨论气体的摩尔数。因此 $pV$ 这一恒量的值取决于气体的摩尔数及其温度。

**查理定律的微观解释** 根据由气体分子运动论出发导出的气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \quad \text{或} \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right)$$

和气体温度的微观实质——气体的热力学温度是气体分子热运动平均平动动能的量度

$$\frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{3}{2} kT,$$

可作如下解释：一定质量的气体，体积保持不变，也就是单位体积内的分子数 $n$ 保持不变。在这种情况下，气体压强大小只与分子平均平动动能成正比。即气体温度升高时，分子平均平动动能增大，气体压强将随热力学温度成正比地增大。气体温度降低时，情况恰好相反。结果是气体压强与热力学温度成正比。

从气体压强公式可导出 $\frac{p}{\frac{1}{2}\overline{mv^2}} = \frac{2}{3} \frac{N}{V}$ ，其中气体分子总数 $N$ 与阿伏

伽德罗常数 $N_A$ 之比就是所讨论气体的摩尔数。因此 $\frac{p}{T}$ 这一恒量的值取决于气体的摩尔数及其体积。

**盖·吕萨克定律的微观解释** 根据由气体分子运动论出发导出的气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \quad \text{或} \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \left( \frac{1}{2} \overline{mv^2} \right)$$

和气体温度的微观实质——气体的热力学温度是气体分子热运动平均平动动能的量度

$$\frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{3}{2} kT,$$

可作如下解释：一定质量的气体，要保持压强不变，也就是分子的总数  $N$  保持不变，同时要在改变温度  $T$ ——改变分子平均平动动能  $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$  时，

调整体积  $V$ ——调整单位体积内气体分子数  $n$ ，使气体压强  $p$  保持不变。在这种情况下，一方面由于温度升高，分子的平均平动动能增大——分子的平均速率增大，以致每次碰撞给器壁的冲量增加，同时单位时间内对单位面积器壁的碰撞次数增多，使气体压强有增大的倾向；另一方面，需要体积增大，使单位体积内气体分子数减少，导致单位时间分子对单位面积器壁的碰撞次数减少，使气体压强有减小的倾向。当体积增大到一定程度时，这两种倾向抵消，可使气体压强保持不变。气体温度降低时，情况应恰好相反。结果是气体体积与热力学温度成正比。

从气体压强公式可导出  $\frac{V}{\frac{1}{2} \overline{mv^2}} = \frac{2}{3} \frac{N}{p}$ ，其中气体分子总数  $N$  与阿伏

伽德罗常数  $N_A$  之比就是所讨论气体的摩尔数。因此  $\frac{V}{T}$  这一恒量的值取决于气体的摩尔数及其体积。

**理想气体的内能及其变化** 理想气体的分子之间除碰撞接触时外没有相互作用，不存在分子势能。因此，理想气体的内能就是气体系统所有分子热运动的动能总和。由于分子热运动的动能跟气体温度有关，分子势能跟气体体积有关。既然理想气体中不存在分子势能，因此它的内能只跟温度有关，跟体积无关。

跟任何物质系统一样，一定质量的理想气体，它的内能的变化同样遵循热力学第一定律  $W + Q = \Delta E_{\text{内}}$ 。下面以等压、等容、等温和绝热等过程为例，分析一定质量的理想气体在状态变化过程中的内能变化情况。

**等压过程：**保持气体压强不变，对一定质量的理想气体缓慢加热，使它由初始状态 变到末状态，温度由  $T_1$  升高到  $T_2$ ，根据气态方程，气体的体积将由  $V_1$  增大到  $V_2$ 。根据气态方程，气体的体积由  $V_1$  增大到  $V_2$ ，过程中，由于温度  $T_2 > T_1$ ，说明气体内能增加， $\Delta E_{\text{内}} > 0$ ；同时体积  $V_2 > V_1$ ，说明气体膨胀对外界做功，对于等压膨胀过程来说，气体对外界所做的功应等于  $p(V_2 - V_1) = p \cdot \Delta V$ 。根据

$$\text{克拉珀龙方程 } pV = \frac{m}{M} RT, \quad p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) \quad \text{即} \quad p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} R \cdot$$

$\Delta V$ 。可用  $P$ - $V$  图象表示这一做功过程，如图(1)所示。其中， $P$ - $V$  线下的

<sup>②</sup> 分析和计算中我们没有涉及分子在空间中的碰撞，这是因为分子间的碰撞通常可视为完全弹性的，而且每个分子质量都相等。因此分子在空间碰撞的结果只是它们之间相互交换动量，并不影响讨论的结果。

面积值表示的就是气体对外界所做的功。

根据热力学第一定律  $W+Q = \Delta E_{\text{内}}$ ，上述过程中气体从外界吸热， $Q > 0$ ；而气体膨胀对外做功， $W < 0$ 。由于气体温度升高， $\Delta E_{\text{内}} > 0$ ，因此，过程中气体所吸热量  $Q$  必大于  $|W|$ 。这说明，在等压膨胀过程中，一定质量的理想气体从外界吸收的热量，一部分用来增加气体的内能，另一部分则用来对外界做功。

等容过程：保持气体体积不变，对一定质量的理想气体缓慢加热，使它由初始状态 变到末状态 ，温度由  $T_1$  升高到  $T_2$ ，根据气态方程，气体的压强将由  $P_1$  增大到  $P_2$ 。在这一过程中，由于温度  $T_2 > T_1$ ，说明气体内能增加， $\Delta E_{\text{内}} > 0$ 。但过程中体积没有改变，没有做功问题， $W = 0$ 。

根据热力学第一定律  $W+Q = \Delta E_{\text{内}}$ ，上述过程中应有  $Q = \Delta E_{\text{内}}$ 。这说明，在等容升温过程中，一定质量的理想气体从外界吸收的热量，全部用来增加气体的内能。

等温过程：保持气体温度不变，使一定质量的理想气体缓慢加热，使它由初始状态 变到末状态 ，体积由  $V_1$  增大到  $V_2$ ，根据气态方程，气体的压强将由  $P_1$  减小到  $P_2$ 。在这一过程中，由于温度保持不变，说明气体的内能也不改变， $\Delta E_{\text{内}} = 0$ 。但过程中体积膨胀  $V_2 > V_1$ ，说明气体对外界做功（跟等压膨胀过程相比，这是气体压强不断变化的做功过程）。经论证可知（由于所用数学知识超出中学范围，论证从略），这一做功过程也可用  $p - V$  图象表示，如图(2)所示。其中， $p - V$  线下的面积值表示的就是气体对外界所做的功。

根据热力学第一定律  $W+Q = \Delta E_{\text{内}}$ ，上述过程中，既然气体对外界做功， $W < 0$ ，而且气体内能的变化  $\Delta E_{\text{内}} = 0$ ，则应有  $Q > 0$  即吸热现象，而且  $Q$  与  $W$  的绝对值相等。这说明，在等温膨胀过程中，一定质量的理想气体要从外界吸收热量，所吸热量并没有增加气体的内能，而全部用来对外做功。

绝热过程：如果一定质量的理想气体由良好的绝热材料与外界隔绝，在状态变化过程中跟外界没有热交换， $Q = 0$ 。根据热力学第一定律  $W+Q = \Delta E_{\text{内}}$ ，由于  $Q = 0$ ，所以在绝热过程中应有  $W = \Delta E_{\text{内}}$ ，即在绝热压缩的过程中，外界对气体所做的功完全用来增加气体的内能，使气体的温度升高；而在绝热膨胀的过程中，则气体对外界所做的功完全靠气体内能的减少，因此气体的温度降低。气体绝热做功过程同样可以用  $p - V$  图象表示，如图(3)所示。跟前面讨论的情况相似，还是用相应过程的  $p - V$  线——绝热线——下的面积值表示气体对外所做的功。为了供对比用，在图中还画出了相等质量同种气体的等温  $p - V$  线。两条图线的交点 A 表示同一状态。如果气体由状态 A 起分别经绝热过程和等温过程膨胀增加同样的体积，由于气体在绝热膨胀对外做功过程中内能减少，温度将降低，气体压强也将低于等温过程。

**熔化（熔解）** 物质从固态转变成液态的过程。晶体物质和非晶体物质在熔化时情况不同。晶体有一定的熔化温度熔点。给晶体加热，当温度升到到熔点时，晶体开始熔化，在熔化过程中，液态与固态并存，继续加热温度保持不变，所提供的热量都用于使它从固态变为液态，直

到全部熔化后，液态物质的温度才继续上升。非晶体没有一定的熔点。温度升高时，非晶体先是由硬变软，再逐渐变成粘稠状液体，最后逐渐变成液体。在整个过程中，温度不停地上升，没有一定的熔化温度，只是有一个从固态软化成液态的一定的温度范围（称为软化温度）。

不同的晶体物质有不同的熔点，熔点是物质的重要性质之一。元素的熔点是原子序数的周期性函数；无机物的熔点一般较高，并随化合价的增加而升高；有机物的熔点一般较低，同族化合物的熔点与其分子量有关；一般来说，纯物质中掺进另一种物质，熔点要降低。熔点还与环境的压强有关。大多数晶体物质熔化时体积膨胀，其熔点随压强的增大而上升；与此相反，若熔化时体积缩小（如冰、灰铸铁、锑、铋等），则熔点随压强的增大而下降；不过压强对熔点的影响并不显著，例如，每增加 1 标准大气压冰的熔点才降低 0.0075 。 1 个标准大气压下的熔点称正常熔点。一般列表备用。

**凝固** 物质从液态转变成固态的过程。晶体物质和非晶体物质在凝固时情况不同。晶体的液态有一定的凝固温度——凝固点。在同样环境下同一种晶体物质的凝固点与它的熔点相同。使晶体的液态向外放热，当温度降到凝固点时，液体开始凝固结晶，在凝固过程中，晶体与其液态并存，继续放热温度保持不变，不断放热使它从液态变为固态，直到全部凝固后，晶体的温度才继续下降。非晶体的液态没有一定的凝固点，当冷却时，随着温度的下降，液体由稀变稠，由软变硬，最后成为固体。在整个过程中，温度不停地下降，没有一定的凝固温度。

**熔化和凝固的微观解释** 在晶体中，粒子（分子、原子或离子）之间的相互作用力使粒子规则地聚集在一起，形成空间点阵。粒子只能在它的平衡位置附近做无规则的微小振动，在低于熔点的情况下，粒子的热运动不足以克服其间的相互作用。给晶体加热时，晶体从外界得到能量，粒子的热运动加剧。达到一定的温度——熔点——时，一部分粒子具有了足够的动能，能够克服粒子间的作用力，离开平衡位置。粒子之间的引力再不能维持它们的有序排列，而逐渐转向无序。这时晶体的点阵结构被破坏，晶体开始熔化。在熔化过程中，外界供给晶体的能量，全部用来破坏晶体的点阵结构，增加分子间的势能，所以温度不发生变化。凝固时，情况正好相反，粒子排列成点阵结构，由无序转向有序排列时，粒子间的势能减小，因此虽然放出能量，温度却保持不变，直到全部凝固成晶体。

非晶体的微观结构本来就跟液体类似，非晶体在吸热熔化过程中不必为破坏点阵结构而消耗能量，所以温度不停地上升。

**熔化热** 在一定压强下，单位质量的某种晶体物质在熔点从固态熔化成同温度的液态过程中所吸收的热量。在国际单位制中，熔化热的单位是焦 / 千克。

晶体在上述条件下的熔化过程之所以需要不断从外界吸收热量，而温度却保持不变，这是由于所吸收的热量（对单位质量物质来说就是熔化热）其中绝大部分用于破坏晶体的点阵结构，增加分子势能。对大多数熔化时体积增大的晶体物质来说，还有很少一部分热量是用来克服外界压力做功。由于体积变化不大，这份功很小，通常可以忽略，认为熔化热与压强基本无关。不同晶体物质的熔化热不同。冰的熔化热是 3.35

$\times 10^5$  焦 / 千克。

液体凝固结晶时要放出热量。在同样条件下，单位质量的同种物质凝固结晶过程中所放出的热量（称为凝固热或结晶热）等于它的熔化热。显然这是由于结晶时分子势能减少，向外释放能量所致。两个过程比较，是符合能的转化和守恒定律的。

熔化热常用字母  $\lambda$  表示。应用熔化热和晶体物质的质量  $m$ ，可计算它熔化时所吸收的热量  $Q$ ： $Q = \lambda m$ 。

**冰的熔化热的测定** 应用量热器，根据绝热条件下热平衡原理进行测定。在质量为  $m_0$  的铜制量热器小筒中装入质量为  $m_1$  的水，测出水和筒的温度  $t_1$ ，然后把正在熔化的温度  $t_2 = 0$  的冰块置于小筒水中，在绝热条件下冰将继续熔化，水温下降。测出冰块全熔后较平稳时小筒中的水温（设在  $0$  以上）以及后来盛水小筒的质量，确定所用冰块质量  $m_2$ 。根据在绝热条件下达到热平衡过程中，冰块熔化成水并升温到  $t_2$  时所吸收的热量与量热器中原有的水及小筒从初温  $t_1$  降低到  $t_2$  所放出的热量应有  $Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}}$  的关系。即可求出冰的熔化热  $\lambda$ 。

由于  $Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}}$ ，即

$$m_2 \lambda + c_{\text{水}} m_2 (t_2 - 0) = (c_{\text{水}} m_1 + c_{\text{铜}} m_0) (t_1 - t_2)$$

$$\text{整理可得：} \quad \lambda = \frac{(c_{\text{水}} m_1 + c_{\text{铜}} m_0)(t_1 - t_2)}{m_2} - c_{\text{水}} (t_2 - 0)。$$

**汽化** 物质从液态变成气态的过程。汽化有两种方式：蒸发和沸腾。蒸发是在液体表面进行的汽化现象，沸腾是在液体表面和内部同时发生的剧烈汽化现象。液体在汽化时需要吸收热量。

**蒸发** 在液体表面进行的汽化现象。在任何温度下都能进行。这是由于在任何温度下的液体中总有一部分分子热运动的动能比跟温度有关的平均动能大。凡是处在液体表面层附近的动能又足够大的分子，就有可能挣脱周围液体分子的引力，飞出液面形成蒸气（也常叫做汽）。

对于液面洁净的同一种液体来说，影响蒸发快慢的因素有三个：液体温度、表面面积以及表面附近的气流速度。

液体温度越高，分子热运动的平均动能就越大，具有足够大的动能因而能够飞出液面的分子也就越多。所以温度越高，蒸发得越快。

液体的表面积越大，处在表面层中的分子就越多，能够从液面飞出的分子也就越多。所以表面积越大，蒸发得越快。

飞出液面的分子如果滞留在液面附近致使蒸气密度增大，不断热运动的汽分子有的会撞到液面，被液体分子重新拉回液体中，这样在同一时间内从液面飞出的分子数与由液面外进入液体的分子数之差就将减小，使蒸发变慢。如果设法把液面上形成的蒸气吹散，使液面附近蒸气密度减小，减少汽分子重新返回液体的机会，蒸发就可以加快。所以蒸发的快慢还跟液面上气体流动的快慢有关系。

在上述同样条件下，不同液体蒸发的快慢不同。这是由于它们各自的分子间作用力大小不一，分子间作用力小的液体容易蒸发。

液体蒸发过程有吸热致冷的作用。这是因为在蒸发过程中，从液体中飞出的是动能较大的分子，这些分子飞出后，留在液体中的分子的平均动能必然减小，所以蒸发时液体的湿度降低。它就要从周围的物体吸

收热量，因而液体蒸发有致冷作用。

**饱和汽** 与同种物质的液态（或固态）处于动态平衡的汽。液体由于蒸发（固体由于升华），它的分子不断飞出形成蒸气，同时由于蒸气中分子的热运动，有的分子会被撞回到液体（或固体）中去。譬如在盛有一部分液体的密闭容器中，在一定温度下，最初液面上方汽的密度随液体的不断蒸发而不断增大，同时返回液体的分子数也逐渐增多。最后，当汽的密度增大到一定值时，将出现在同一时间内回到液体中的分子数等于从液面飞出去的分子数这样的状态。这时的密度不再增大，液体也不再减少，液体和汽之间出现了热动平衡，这是一种动态平衡。这时液体上方的汽就是在这温度下该种液体的饱和汽。把没有达到饱和状态的汽就叫做未饱和汽。在一定温度下，某种液体（或固体）的饱和汽的密度是确定的，显然，未饱和汽的密度一定小于这种温度下同一物质的饱和汽密度。

**饱和汽的密度跟温度的关系** 在一定温度下，某种液体的饱和汽密度具有确定值。在不同的温度下，饱和汽密度值不同。温度升高时，液体分子的平均动能增大，单位时间里从液面飞出的分子数增多，在同一时间内从液面飞出去的分子数多于回到液体中的分子数，原来的动态平衡被破坏，液体得以继续蒸发，汽的密度有所增大，直到同一时间内回到液体中的分子数增多到能重新出现动态平衡为止。所以饱和汽的密度随温度的升高而增大。与此相反，温度降低时，单位时间里从液面飞出的分子数随液体分子平均动能的减小而减小，致使在同一时间内回到液体中的分子数多于从液面飞出的分子数，原来的动态平衡被破坏，汽的密度有所减小，液态物质有相应的增加，直到同一时间内回到液体中的分子数减少到能重新出现动态平衡为止。所以饱和汽的密度随温度的降低而减小。

**饱和汽压** 某种液态物质（或固态物质）的饱和汽所具有的压强。在一定温度下，各种物质（不论液态还是固态）都有一定的饱和汽压。在同一温度下，各种物质的饱和汽压一般是不同的。以液体为例，挥发性大的液体，它的饱和汽压大。如：同在 20℃，水的饱和汽压为 17.54 毫米汞柱，水银的饱和汽压则很小，仅有 0.0012 毫米汞柱，而挥发性很大的乙醚则高达 440 毫米汞柱。

同种物质在不同温度下，饱和汽压不同，随温度的升高而增大，随温度的降低而减小。由于气体压强宏观上由气体的密度和温度决定，微观上也就是由单位体积的气体分子数和分子热运动的平均平动动能所决定。饱和汽压随温度的升高而增大也是由这两方面的原因引起的，一个是与低温时比较，温度升高后，饱和汽的密度增大，即单位体积的汽分子数增大；同时由于温度的升高，汽分子热运动的平均平动动能也增大。这两方面的原因都导致饱和汽的压强增大，因此饱和汽压随温度的升高增大得很快。如图所示的是水的饱和汽压与温度的关系图象。可以看出，饱和汽压随温度的升高而增大，但其间的函数关系不是线性的。

同种物质在同一温度下，饱和汽压跟汽的体积无关。这是由于当汽的体积有所增大时，其中汽的密度暂时有一定程度的减小，致使原来的饱和汽变成了未饱和汽。只要还有液态物质，必将继续蒸发，直到汽的密度恢复如初，未饱和汽又重新成为这种温度下的饱和汽为止。既然温

度没有改变、汽的密度又已重新恢复，即分子热运动的平均平动动能没有改变、单位体积的汽分子数也前后等同，因此饱和汽压仍保持同一数值。相反，当汽的体积有所减小时，暂时汽的密度有一定程度的增大，致使回到液体中的分子数多于从液面飞出的分子数，使一部分汽液化成液体，直到汽的密度有所减小，恢复到这种温度下的饱和汽原来的密度。因此，饱和汽压仍保持同一数值。这说明在温度不变的情况下，同种物质的饱和汽压不随体积而变化。

由于饱和汽压跟温度的关系不是线性的，而且饱和汽压跟体积无关。因此，理想气体的有关规律不适用于饱和汽。

**沸腾** 在一定压强下，液体温度升高到一定数值时，在液体表面和内部同时发生剧烈汽化的现象。沸腾时，液体内部尤其是在容器的底和器壁处涌现出大量气泡上升，到液面破裂。以水的沸腾过程为例：给盛水的容器底部加热，原来吸附在容器底和器壁上的空气以及溶在水中的空气析出形成一些小气泡。由于周围的水向气泡里蒸发，因此气泡内包含有空气和饱和水蒸气，气泡由于受热温度升高，水向气泡里蒸发增加，致使汽的压强增大，气泡就脱离器底浮起。但在达到沸腾温度前，气泡上升过程由于周围水温较低，并因泡内蒸气的部分液化而逐渐缩小。到升到水面破裂时，放出的主要是空气。在外界一定压强下，当水温升高到某一温度时，气泡内的饱和水汽压增大到等于外界对气泡的压强<sup>外</sup>时，气泡在上升过程中不仅不再缩小，而且周围的水还将不断向泡内蒸发，体积继续增大，直到升到液面破裂，这时从气泡里放出的主要是水蒸气。这就是水的沸腾。由上述过程可知，液体只有在它的饱和汽压等于外界压强时才能沸腾。在外界压强是 1 标准大气压的情况下，水在 100 沸腾，就是因为 100 水的饱和汽压值为 760 毫米汞柱，等于外界的 1 标准大气压。

在一定的外界压强下，液体沸腾时温度保持不变，这个温度叫做沸点。沸点与液体性质及外界压强有关。同一外界压强下，液体不同，各自的沸点不同。一个标准大气压下液体的沸点称正常沸点，一般列表备用。同一种液体，外界压强改变时，沸点也改变。当外界压强增大时，需要使液体升到较高的温度时饱和汽压才能等于外界较大的压强开始沸腾，因此沸点升高。相反，当外界压强减小时，液体在较低的温度下饱和汽压就能等于外界压强出现沸腾，所以沸点降低，对于水，外界压强比 1 标准大气压增加（或减少） $3.6 \times 10^3$  帕时，沸点升高（或降低）1

液体在沸腾过程需不断从外界吸收热量，用于使物质从液态变为气态。（见“汽化热”）

**汽化热** 在一定压强下，单位质量的某种液态物质变为同温度的气态过程中所吸收的热量。在国际单位制中，汽化热的单位是焦/千克。

液体在沸腾过程需不断从外界吸收热量，用于使物质从液态变为气态。（见“汽化热”）汽化热在一定压强下，单位质量的某种液态物质变为同温度的气态过程中所吸收的热量。在国际单位制中，汽化热的单位是焦/千克。液体在沸点温度发生沸腾时，液体变为蒸气，体积膨

---

<sup>外</sup> 界对气泡的压强包括大气压强和气泡所在水深处水的压强，当水深不大时后者可忽略。

胀，分子之间的距离增大。沸腾过程中液体所吸收的热量，一部分用来克服分子间的引力做功增大分子的势能（称为内功）；另一部分则用于体积膨胀时克服外界压力做功（称为外功）。液体在一般温度下蒸发时，液体所吸收的热量，也同样消耗在上述两部分做功过程中，所不同的是蒸发在任何温度下都可以进行。这就是液体汽化（包括蒸发和沸腾）时需要汽化热的原因。不同液态物质的汽化热不同。同一种液态物质在不同温度下的汽化热也不同，而且随着温度的升高，物质的汽化热变小。这是由于温度升高后，液体分子间的距离增大一些，因此汽化时克服分子间引力需要做的功减小一些。例如水在 100℃ 时的汽化热是  $2.26 \times 10^6$  焦 / 千克，在 200℃ 时只需  $1.94 \times 10^6$  焦 / 千克，而在 50℃ 时则需要  $2.38 \times 10^6$  焦 / 千克。

与汽化过程相反，汽液化为液态时要放出热量。单位质量的汽液化为同一温度下的液态时放出的热量，等于该温度下液化的汽化热。

汽化热常用字母  $L$  表示。应用某液体的质量  $m$ ，即可计算它汽化时所吸收的热量  $Q$ ：

$$Q = Lm。$$

应用量热器，根据绝热条件下热平衡原理可以测定一些液体的汽化热。譬如水的汽化热的测定：

在质量为  $m_0$  的铜制量热器小筒中装入质量为  $m_1$  的水，测出水和小筒的温度  $t_1$ ，然后把正在沸腾的水产生的温度  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  并已被滤去水滴的蒸气通入量热器小筒水中，在绝热条件下蒸气将液化成水，小筒中水温升高。当水温升高到相当度数  $\theta$  时，停止通汽。测出后来盛水小筒的质量，确定已被液化的蒸气质量  $m_2$ 。根据在绝热条件下达到热平衡过程中，蒸气液化成水并降温到  $\theta$  时所放出的热量与量热器中原有的水及小筒从初温  $t_1$  升高到  $\theta$  所吸收的热量应有  $Q_{\text{放}} = Q_{\text{吸}}$  的关系。即可求出水的汽化热  $L$ 。

由于  $Q_{\text{放}} = Q_{\text{吸}}$ ，即

$$Lm_2 + c_{\text{水}}m_2(t_2 - \theta) = (c_{\text{水}}m_1 + c_{\text{铜}}m_0)(\theta - t_1)$$

$$\text{整理可得：} L = \frac{(c_{\text{水}}m_1 + c_{\text{铜}}m_0)(\theta - t_1)}{m_2} - c_{\text{水}}(t_2 - \theta)$$

**液化** 物质从气态变为液态的过程，又称凝结。气态物质在液化时向周围环境放热，单位质量的某种气态物质在液化时放出的热量，等于它在同一温度和压强下由液态物质变为气态时吸收的汽化热。在临界温度以下的气体，都可以液化。液化可利用增大压强或降低温度，或者同时增压降温并用等方法来实现。物质的未饱和汽经增压降温等方法后变为饱和汽，就能使它液化。

**把未饱和汽变为饱和汽的方法** 在一定温度下，用增大压强的办法可以把未饱和汽变为饱和汽。这是由于在一定温度下，饱和汽的密度大于未饱和汽的密度。在保持温度不变的条件下，增大压强就可以减小未饱和汽的体积导致密度增大，当密度增大到等于该温度下饱和汽的密度时，未饱和汽也就成了饱和汽。如果进一步减小饱和汽体的体积，就能使饱和汽凝结成液体。

在汽的密度一定时，用降低温度的办法也可以把未饱和汽变为饱和

汽。这是由于在不同温度下饱和汽的密度不同。在高温条件下，饱和汽的密度大；低温条件下则饱和汽的密度小。那么对于在较高温度时由于密度小于该温度下的饱和汽的密度而处于未饱和状态的未饱和汽来说，在保持体积不变的情况下，降低它的温度，则当温度降到某一数值致使原未饱和汽的密度跟该温度下的饱和汽密度相等时，原来较高温度时未饱和汽也就成了较低温度时的饱和汽。如果继续降低环境温度使饱和汽不断放热就会使它凝结成液体。

用同时增大压强和降低温度的方法可以更快地把未饱和汽变成饱和汽，并可进而使它液化，凝结成液体。

**各临界温度** 各种气体都有一个特殊的温度，在这个温度以上，无论怎样增大压强也不能使气体液化。这个温度叫做临界温度。即物质处于临界状态<sup>外</sup>时的温度。也就是物质以液态形式出现的最高温度。水的临界温度高达 374 ，而氦的临界温度仅为 - 267.9 。在 19 世纪曾把在当时技术条件下不能液化的气体，如氢、氧、氮等，称为“永久气体”。研究表明，这些气体在当时之所以没有被液化，是由于它们的临界温度很低（如：氢为 33K，氮为 126K，氧约为 154K。最低的是氦约为 5K），当时的低温技术尚未获得这样的低温。许多科学工作者致力于提高获取低温的技术，最后，在 20 世纪初，所有的气体均被液化。最后一个被液化的气体是氦，于 1908 年实现液化（由荷兰物理学家开默林-昂内斯完成），后来还凝固成固态氦。“永久气体”的名称遂成为历史（实际上当 1877 年将氧气液化后，这个名称就已被取消）。

**低温物理现象** 低温一般指比 81K( 液态空气在 1 大气压下的沸点) 还低的温度，其中低于 1K 的温度叫做超低温（当代的超低温技术已能达到的最低温度为  $1 \times 10^{-6}$ K，正向获取更低温度发展）。处于低温下的物质具有一些在常温下所没有的物理特性。如超导电性、超流动性等。

**超导电性：**某些元素、合金和化合物在低温条件下呈现电阻等于零和排斥磁力线的性质。这类物质称为超导体。例如最初发现超导电性的荷兰物理学家开默林-昂内斯，在 1911 年利用液态氦使水银温度降到 4.2K 附近时，发现它的电阻突然降到零。1933 年迈纳斯等实验发现，在超导体进入超导态后，体内的磁场恒等于零，把磁力线全部排斥在体外，出现完全抗磁性。在 80 年代对超导体的研究获得突破性进展，例如 1987 年我国赵忠贤等获得液氮温区高临界温度超导体（起始转变温度在 100K 以上）。

**超流动性：**液态氦沿饱和蒸气气压线下降到 2.172K 时，液氦的物理性质立即发生很大变化。在这个温度以下时，液氦可以在低速下毫无阻尼地流过内径小到只有  $10^{-8}$  米的毛细管。这种没有阻尼的流动就称为超流动性。

**过饱和汽** 在一定温度下，超过该温度饱和汽所应有的密度而仍不液化或凝华的蒸气。由于它的密度对应于较高温度时饱和汽的密度，所以过饱和汽又称“过冷蒸气”。

在通常情况下，当温度降低到使未饱和汽成为饱和汽后，如果继续减小汽的体积或降低环境温度，蒸气就凝结为液体。这是因为一般蒸气

---

<sup>外</sup> 界对气泡的压强包括大气压强和气泡所在水深处水的压强，当水深不大时后者可忽略。

中都含有尘埃和杂质，成为蒸气的凝结核。而对于纯净的蒸气来说，由于没有凝结核，在降温中会形成过饱和汽。过饱和汽是不稳定的，如果其中有凝结核出现，就会马上发生凝结，使蒸气回到饱和状态。在原子核物理研究中观测微观粒子径迹的“威尔逊云室”就利用了过饱和汽的这一特点。

**过热液体** 纯净液体在温度超过它的沸点时仍不沸腾，这种液体叫做过热液体。

吸附在容器壁上的和溶解在液体中的空气在液体被加热时形成气泡，成为液体内部的汽化核。在液体沸腾，气泡上升到液面破裂时，空气和蒸气一同被放出。经过多次煮沸的液体，由于里面的空气已经放尽，形不成汽化核，所以加热到沸点以上也不沸腾，成为过热液体。过热液体是不稳定的。如果有尘屑进入，或由于液体内部自发地产生极小的气泡，形成汽化核，周围的高温液体就会迅速地向其中蒸发，使液体突然剧烈地沸腾起来，发生暴沸。在高能物理研究中用来控制高能粒子运动径迹的“气泡室”，就是应用过热液体这一特点的仪器。

**过冷液体** 在温度降低到凝固点以下时也不会凝固的纯净液体。

液体凝固为晶体，需要有晶核存在。液体中的尘埃、杂质等微粒都可以作为晶核。而纯净的液体中则没有晶核。过冷液体是不稳定的，如果有尘屑进入，就以其为晶核立即开始凝固。飞机在过冷水滴组成的云层中飞行时，将会在机翼、机身上结成冰层，影响正常飞行。

**绝对湿度** 空气湿度的一种表示方式。用单位体积的空气中所含水蒸气的质量——空气中所含水蒸气的密度——来表示。由于直接测量空气中水蒸气的密度比较困难，而水蒸气的压强是随水蒸气密度的增大而增大的，所以通常都用空气中水蒸气的压强来表示空气的湿度。即空气中所含水蒸气的压强叫做空气的绝对湿度。

**相对湿度** 空气湿度的另一种表示方式。某温度时空气中实际含水蒸气密度跟同一温度下饱和水蒸气密度的百分比。由于在同一温度下，水蒸气的压强跟水蒸气的密度成正比，因此，相对湿度也就等于某温度时空气的绝对湿度跟同一温度下水的饱和汽压的百分比，可表示空气中水蒸气离饱和状态的远近。

譬如空气的绝对湿度  $p=9$  毫米汞柱，气温是  $16^\circ\text{C}$ ，可以查表得知  $16^\circ\text{C}$  的水的饱和汽压值  $p=13.63$  毫米汞柱。那么这时空气的相对湿度

$$B = \frac{p}{P} \times 100\% = \frac{9}{13.63} \times 100\% = 66\%$$

反之，如果知道了某一温度下的相对湿度  $B$ ，再查表得出该温度下的水的饱和汽压  $P$ ，也可计算出绝对湿度  $p=P \cdot B$ 。

在绝对湿度一定的情况下，气温降低时，相对湿度将增大。

**露点** 空气湿度的又一种表示方式。指在气压不变、空气中水蒸气含量没有增减的情况下，使空气中的水蒸气刚达到饱和时的温度。根据露点和气温的差值，可以大致判断出空气中水蒸气的饱和程度，从而判断出相对湿度的大小。

露点可以用露点湿度计测定。测出露点后，从水的饱和汽压表查出露点时的饱和汽压，即空气在原来温度时的绝对湿度。再查出原来温度下的饱和汽压，就可以测算出当时的相对湿度。譬如，气温是  $20^\circ\text{C}$ ，测

出露点是 12 ，那么经查表，12 时的饱和水汽压为 10.52 毫米汞柱，这就是 20 时的绝对湿度 p；再查出 20 下的饱和水汽压 p=17.54 毫米汞柱。因此，20 时的相对湿度

$$B = \frac{p}{P} \times 100\% = \frac{10.52}{17.54} \times 100\% = 60\%$$

测出露点后，可以根据天气预报的日最低温度事先知道夜间是否有露或霜冻。如果最低温度低于露点，若它们都高于 0 则将有露出现；若最低温度在 0 以下（露点可在 0 以上或以下，只要最低温度低于露点），则将有霜冻出现。

**湿度计** 测量湿度的仪器。常用的有露点湿度计、干湿泡湿度计和毛发湿度计等。

**露点湿度计**：就是测定露点的仪器。测出露点后就能查表确定绝对湿度并测算出相对湿度。该仪器在有抛光面的金属容器中盛有乙醚，用打气的办法促使乙醚迅速蒸发吸热致冷，致使金属容器和周围空气降温。当其抛光面上有水汽凝结的瞬时，金属容器的温度就是露点，可用温度计测出。它测值准确，但需查表计算。

**干湿泡湿度计**：它由两支完全相同的温度计组成。干泡温度计用来测量空气的温度；测温泡上包着浸在水中的棉纱的湿泡温度计，由于水的不断蒸发使其读数总低于干泡温度计的。空气相对湿度的大小直接影响着水的蒸发快慢，空气越潮湿即相对湿度越大，水蒸发越慢，干湿泡温度计之间的温度差就越小，反之空气越干燥，即相对湿度越小，水蒸发越快，两温度计间的温度差就越大。根据这个温度差和相对湿度的对应关系绘制成表或曲线，平时即可根据读出的温度差查出对应的相对湿度值。它使用方便，测值准确。

**毛发湿度计**：利用人的头发在脱脂后，其长度会随着空气的相对湿度的增大而伸长、相对湿度的减小而缩短的现象制成。它使用方便，但测值不太准确，需经常校验。

### 三、电磁学

**电荷** 物质的一种固有属性。电荷有两种：正电荷和负电荷。物体由于摩擦、加热、射线照射、化学变化等原因，失去部分电子时物体带正电，获得部分电子时物体带负电。带有多余正电荷或负电荷的物体叫带电体，习惯上有时把带电体叫做电荷。

电荷间存在相互作用。静止电荷在周围空间产生静电场，运动电荷除了产生电场外还产生磁场。因此，静止或运动都会受到电场力作用，只有运动电荷才能受磁场力作用。

电荷的数量叫电量，用符号  $Q$  表示，单位是库仑（仑）（ $C$ ）。库仑是一个很大的单位。电荷有一突出的特性即量子性，自然界存在电荷的最小单位元  $e$ （基本电荷）， $e=1.60 \times 10^{-19}$  库。一个电子所带负电和一个质子所带正电的数量都是  $e$ 。迄今为止，我们所发现的电量都是  $e$  的整数倍（理论上曾预测存在  $\frac{1}{3}e$ 、 $\frac{2}{3}e$  的分数电荷）。 $e$  很小，我们通

常接触到的电量相对很大，可以不考虑电荷的量子性。但在一些问题上电荷的量子性是至关重要的。例如：质量为  $2 \times 10^{-16}$  千克的带电油滴，静止于相距 3.2 厘米两水平的平行金属极间。油滴带电最小是  $1.60 \times 10^{-19}$  库，所以两极间所加电压最大是 400 伏（ $g=10$  米/秒<sup>2</sup>）。

金属导体中的自由电子、电解溶液和电离气体中的正负离子，在电场力作用下能在金属内、电解液和电离气体内自由运动，它们叫自由电荷。电介质中的正负电荷，在电场力作用下只能在原子或分子范围内做微小位移，它们叫束缚电荷。

电荷遵守电荷守恒定律，这是自然界最普遍的规律之一。

**电荷守恒定律** 物理学的基本定律之一。在与外界没有电荷交换的一个系统内，总电荷量不变（电荷的代数和不变）。电荷的总量既不能创造，也不能消失，只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。

电荷守恒定律是从大量实验概括得出的自然界的基本规律，对宏观现象、微观现象都适用，对所有惯性参考系都成立。

在两个电中性的物体摩擦起电现象中，电子从一个物体转移到另一个物体。失去电子的物体带正电，获得电子的物体带负电。两个物体正负电荷数量相等。电荷代数和保持为零。如：硬橡胶棒与毛皮摩擦后，硬橡胶棒带的负电与毛皮带的正电数量相等。

在中性绝缘导体的静电感应现象中，外界的施感电荷使导体上自由电子重新分布，导体靠近施感电荷的一端和远离施感电荷的另一端带上异种电荷。导体上感应电荷的代数和保持为零。把导体任意分成两部分，两部分一定带等量异种电荷。

在电容器的充放电现象中，两个原来不带电的电容器  $C_1$ 、 $C_2$  串连后接到电源上充电，每个电容器的带电量必然相等。

在恒定电流电路中，电荷分布不随时间变化。根据电荷守恒，对任何一个区域说，流进来的电流等于流出去的电流。

在核衰变、核反应和粒子转化等微观过程中，电荷的量子性很突出。

原子核、粒子的电荷都是基本电荷的整数倍，所以电荷守恒表现为

电荷数的代数和守恒。

**库仑定律** 电学基本定律之一，描述真空中两个点电荷间相互作用的规律。内容为：真空中两点电荷间相互作用力的方向沿两点电荷的连线，同种电荷相斥、异种电荷相吸，作用力大小与每个点电荷的电量成正比，与两点电荷间的距离的平方成反比。作用力的大小写成公式是  $F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ ，其中k是静电力常量， $k = 8.988 \times 10^9 \text{牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2$ 。

库仑定律是法国物理学家库仑于1785年通过库仑扭秤实验的分析得出的。库仑定律的适用条件是：点电荷；点电荷静止；点电荷在真空中。在空气中库仑定律近似成立。

点电荷是没有大小的带电体，是一种理想模型。实际的带电体（包括电子、质子等）都有一定大小，都不是点电荷。当电荷间距离大到可认为电荷大小、形状不起什么作用时，可把电荷看成点电荷。

对非点电荷间的相互作用力，可看成许多点电荷间相互作用力的叠加。静止点电荷对运动点电荷的作用力可用库仑定律计算，但运动点电荷对静止点电荷的作用力一般不能用库仑定律计算。

库仑定律中平方反比关系的精确的实验验证，是通过导体静电平衡时电荷分布于外表面来进行的。1971年的实验表明，与2的误差不大于  $2 \times 10^{-16}$ 。库仑定律与万有引力定律都是平方反比的关系，这两个定律间是否有联系至今还不清楚。

点电荷  $Q_1$ 、 $Q_2$  的相互作用实质是通过电场来实现的。 $Q_1$  产生电场  $E_1$ ， $E_1$  对  $Q_2$  有作用力。 $Q_2$  产生电场  $E_2$ ， $E_2$  对  $Q_1$  有作用力。

均匀带电球面或均匀带电球体间的相互作用，与电荷集中于球心的点电荷间的相互作用等效。

应用库仑定律时要注意分析两点电荷的电量和它们间的距离。例如：两个完全相同的金属小球 A、B 带电为 +Q 和 -2Q，相距 r 时作用力为 F。如拿来一个完全相同的金属小球 C（带电为 -2Q），C 先与 A 接触

则 C、A 带电为  $-\frac{Q}{2}$ ，然后 C 与 B 接触则 C、B 带电为  $-\frac{5Q}{4}$ ，C 移走后，

使 A、B 相距为  $\frac{r}{2}$ 。这时 A、B 间的相互作用力变为  $\frac{5}{4}F$ 。

**库仑定律应用思路** 应用库仑定律研究电荷间的相互作用，这实质是一个力学问题，应该按力学概念、规律来分析解决。要注意的是库仑力的特点。两点电荷间库仑力大小相等，不是电量大的受力大；库仑力的方向沿两点电荷的连接线，画图表示库仑力方向。

例 1. 带电量为 +4Q 和 -Q 的点电荷 A、B 相距 l，要求引入第三个点电荷 C，使三个点电荷在库仑力作用下都处于平衡状态。求 C 的电荷和位置。根据每个电荷受其他两个电荷的库仑力作用和平衡条件，我们先判定出 C 一定位于 A、B 连线上 B 的右侧，设距 B 为 x。C 应带正电  $Q_C$ 。

对每个点电荷建立平衡方程为（电量都取绝对值）。

$$A : k \frac{4Q \cdot Q_C}{(l+x)^2} = k + Q \frac{4Q \cdot Q}{l^2}$$

$$B : k \frac{4Q \cdot Q_c}{l^2} = k \frac{Q \cdot Q_c}{x^2}$$

$$C : k \frac{4Q \cdot Q_c}{(l+x)^2} = k \frac{Q \cdot Q_c}{x^2}$$

3 个方程任取其中两个联立解得： $Q_c=4Q$ ， $x=l$ 。

例 2 . 带电量均为+Q 的两个点电荷相距为 2l , 在它们连线中点 O 有一点电荷 -q , 把 -q 沿两点电荷联线的中垂线移动一距离 x , -q 受点电荷 +Q 的引力为  $F_1 = \frac{Qq}{l^2}$  , 合力为  $2k \frac{Qq}{l^2} \cos\theta$  , F 指向平衡位置 O ,  $\cos\theta = \frac{x}{l}$  。如果位移 x 极小 , 可认为  $l' \approx l$  ,  $F = \frac{2kQq}{l^3} x = kx$  , 即回复力 F 与位移 x 成正比。所以 , -q 释放后将做简谐振动。

**库仑** 法国工程师和物理学家(1736 ~ 1806) 。库仑从小就勤奋好学 , 中学时爱好数学和物理。1776 年后他到巴黎从事科学研究工作。他关于摩擦的论文集是 18 世纪摩擦实验、理论之大成 , 库仑正确建立了摩擦定律 : 最大静摩擦力与正压力成正比、与接触面积无关 ; 滑动摩擦力与滑动速度无关 ; 最大静摩擦力大于滑动摩擦力。库仑对摩擦的出色研究受到法国科学院的奖赏 , 被选为科学院院士 , 库仑还研究结构力学、砖建筑、梁的断裂、扭曲等 , 是 18 世纪欧洲伟大的工程师之一。

英国的普里斯特利发现电的相互作用后 , 库仑发明精确测量微小力的扭秤。库仑通过扭秤实验归纳得出磁极相互作用的磁库仑定律和点电荷相互作用的电库仑定律。库仑在实验中为解决测量电量的困难 , 巧妙地利用对称性 , 将一个带电金属球与另一个同样材料做成的完全一样的金属球接触后分开 , 则每个金属球的带电量都是原来电量的一半。著名的点电荷相互作用的库仑定律是电学的基本实验定律 , 有很重要的意义。

**电场** 电磁场的一个方面 , 是一种物质。电场的基本特性是对静止或运动电荷有作用力 , 电场对电荷作用力的大小为  $F=qE$  , 正电荷受力方向与场强 E 的方向相同 , 负电荷受力方向与场强方向相反。场强 E 是描述电场特性的物理量。为形象描述电场的分布 , 我们画电力线作为辅助工具。

电场有两种 : (1) 电荷激发的电场。静止电荷激发的电场叫静电场。静电场的电力线起于正电荷终止于负电荷 , 或从无穷远到无穷远。静电力移动电荷做功具有与路径无关的特点。可引入电势、电势差描述电场 , 又可画等势面形象地说明电场的分布。电荷激发的电场又叫做库仑电场。(2) 变化磁场激发的电场。又叫感应电场或涡旋电场。感应电场的电力线是闭合的 , 没有起点、终点。闭合的电力线包围变化的磁场。

空间中各点场强的大小、方向都相同的电场叫匀强电场或均匀电场 , 匀强电场的电力线是疏密相同的平行直线 , 等势面是疏密相同的平行平面。

两静止点电荷间的相互作用是通过静电场产生的。

**电场强度** 描述某点电场的特性的物理量 , 符号是 E , E 是矢量。

电场强度简称场强 , 定义为  $E = \frac{F}{q}$  , E 的方向与正检验电荷 q 的受力方向

相同。场强的定义是根据电场对电荷有作用力的特点得出的，对电荷激发的库仑电场和变化磁场激发的涡旋电场都适用。场强的单位是牛/库或伏/米，两个单位名称不同大小一样。场强  $E$  数值上等于单位电荷在该点受的电场力， $E$  的方向与正电荷受力方向相同。

电场的特性是对电荷有作用力，电场力  $F=qE$ ，正电荷受力方向与  $E$  方向相同，负电荷受力方向与  $E$  方向相反。电场是一种物质，具有能量，场强大处电场的能量大。

根据场强定义和库仑定律知，静止点电荷  $Q$  产生电场的场强  $E = k \frac{Q}{r^2}$ ，

$r$  为该点  $P$  到  $Q$  的距离。 $Q$  为正电荷时， $E$  的方向沿  $QP$  连线背离  $Q$ 。 $Q$  为负电荷时， $E$  方向沿  $QP$  连线指向  $Q$ 。几个点电荷或其他电荷产生的场强，可看成许多点电荷产生的场强的叠加。

已知电场强度可判定电场对电荷的作用力，电介质（绝缘体）的电击穿与场强大小有关。

**电力线** 为形象地描述场强的分布，在电场中人为地画出一些有方向的曲线。曲线上一点的切线方向表示该点场强的方向。电力线的疏密程度与该处场强大小成正比。

法拉第提出力线概念。他用磁力线描述磁场，用电力线描述电场。法拉第认为电力线、磁力线是客观存在的一种物质，力线像橡皮筋能够收缩具有张力。法拉第用力线概念研究电场、磁场。麦克斯韦在法拉第研究的基础上进一步建立了电磁场理论。我们认识到电场是一种物质，电力线不是客观存在的一种物质，而是我们人为地画出的形象描述电场分布的辅助工具。

在没有电荷的空间，电力线具有不相交、不中断的特点。静电场的电力线还具有下列特性：(1)电力线不闭合，始于正电荷终止于负电荷；(2)电力线垂直于导体表面；(3)电力线与等势面垂直。感应电场的电力线具有下述特性：(1)电力线是闭合的；(2)闭合的电力线包围磁力线。

一些典型的电场的电力线如图所示。

知道一个电场的电力线，就可判定场强的方向和大小，就可画出等势面，能判定电势高低（沿电力线方向电势降低）。

应该注意，一般说电力线不是电荷的运动轨迹。根据电力线方向能确定电荷的受力方向和加速度方向，不能确定电荷的速度方向、运动轨迹。电力线是直线时，电荷运动速度与电力线平行或静止，电荷运动轨迹与电力线重合。

**如何确定场强** 场强是分析求解电场的基本问题之一。根据的概念、规律有：

(1)场强定义。已知电荷  $q$  和所受的电场力  $F$ ，可根据定义  $E = \frac{F}{q}$  求

场强。

(2)点电荷场强和电场叠加原理。已知点电荷的位置和电量，可用点电荷的场强和电场叠加原理求总电场场强。

(3)场强与电势差关系。在匀强电场中  $E = \frac{U}{d}$ ，已知电势差  $U$  和等势

面间距离  $d$  可求  $E$ 。

(4) 静电平衡条件和电场叠加原理。导体处于静电平衡状态时内部场强为零，即施感电荷与感应电荷在导体内部产生的场强为零。已知施感电荷可求感应电荷在导体内产生的场强。

例如：长为  $l$  的导体棒原来不带电，现将一带电量为  $q$  的点电荷放在距棒左端  $R$  处。求棒上感应电荷在棒内中点  $C$  处产生的场强。

感应电荷在  $C$  点产生的场强与点电荷  $q$  在  $C$  点产生的场强大小相等、方向相反，故感应电荷在  $C$  点产生的场强大小为  $k \frac{q}{(R+l/2)^2}$ ，方向向左。

应该注意以上几个公式的适用条件的不同。定义  $E = \frac{F}{q}$  是普遍适用的。 $E = k \frac{Q}{r^2}$  适用真空中静止的点电荷。 $E = \frac{U}{d}$  适用于匀强电场。电场叠加原理是普遍适用的。

(5) 电力线。确定场强方向、判定场强大小。

(6) 等势面。确定场强方向、判定场强大小。

**电势** 也叫电位，描述静电场特性的物理量，是标量。

电场中某点  $a$  的电势  $U_a$  定义为：把单位正电荷从  $a$  点移到电势标准点  $P$  ( $P$  点电势选定为零) 的过程中电场力做的功。电势的单位是伏 ( $V$ )。

根据库仑定律和电场叠加原理可以证明静电场的一个重要特点：电荷在电场中移动时电场力做的功与移动的路径无关，与起点和终点位置有关。这是引进电势概念的依据。

电场中某点的电势与电势标准点的选取有关，这是电势的相对性。一般说，电势标准点可任意选取。理论上为了简便常取无穷远处电势为零，发电、输电、用电等常选取地球电势为零，电子仪器设备中常选取底板电势为零。

选取无穷远处电势为零时，点电荷  $Q$  产生的电场中距  $Q$  为  $r$  的一点的电势  $U = k \frac{Q}{r}$ 。 $Q$  有正负， $U$  也有正负。由此可知：正电荷周围各点电势为正，距正电荷越远电势越低；负电荷周围各点电势为负，距负电荷越远电势越高。

引入电势概念的意义在于：场强是矢量，电势是标量，用电势研究电场较简便；实践上知道电势可求电势差，由此可判定电流方向、电场力做的功、电能的转化等。

电势和场强都是描述电场的物理量，但应注意它们的区别：

(1) 场强能描述库仑电场和感应电场，定义  $E = \frac{F}{q}$  普遍适用。电势描述库仑电场的特性，上述定义只适用库仑电场，对感应电场不适用；

(2) 电场中某点场强大小与电势高低没有关系。某点场强大，电势可能高、可能低、可能为零。场强与电势的空间变化有关。

电势与电势能不同。电势  $U_a$  描述  $a$  点电场特性，电势能是电荷  $q$  位于  $a$  点所具有的势能， $W = qU_a$ 。

不存在  $q$  就不能有电势能，但有电势。

**等势面** 也叫等位面，电场中电势相等的各点组成的曲面。

等势面是形象描述电场中电势分布的工具。画等势面时通常规定相邻两等势面间的电势差相等。

等势面的性质：

(1) 等势面与电力线垂直。

根据等势面形状能知道场强方向，场强垂直等势面且指向电势降低的方向。

(2) 场强大处等势面密集，场强小处等势面稀疏。根据电场的电力线图可画出等势面，反之，根据等势面图可画出电力线。

电荷沿等势面移动时电场力不做功。

导体静电平衡时，导体上各点电势相等，导体表面是一个等势面。

等势面可用实验测定。

**电势差** 又叫电位差，电场中两点电势的差值，电场中  $a$ 、 $b$  两点的电势差  $U_{ab}=U_a-U_b$ 。

电势差  $U_{ab}$  数值上等于把单位正电荷从  $a$  移到  $b$  时电场力做的功。电势差  $U_{ab}$  有正负， $U_a > U_b$  时  $U_{ab}$  为正， $U_a < U_b$  时  $U_{ab}$  为负。有时谈到电势差时只取绝对值。

电势是相对的，某点电势随电势标准点的选取不同而变化。

电势差不随电势标准点的选取不同而改变。电场力做功公式  $W_{ab}=qU_{ab}=q(U_a-U_b)$  体现了电势差的意义。

根据这个公式：

(1) 已知  $a$ 、 $b$  两点间的电势差  $U_{ab}$ ，可简便求出电荷  $q$  从  $a$  点移到  $b$  点时电场力做的功  $W_{ab}$ ，从而知道消耗的电能多少。

(2) 已知电荷  $q$  (有正负) 从  $a$  点移到  $b$  点电场力做的功  $W_{ab}$  (有正负)，可求出电势差  $U_{ab}$ ，可判定  $a$ 、 $b$  两点电势高低。

(3) 已知电势差  $U_{ab}$  和电场力做的功  $W_{ab}$  (都有正负)，可求电荷  $q$  (有正负)。在匀强电场中  $U=Ed$ ，根据电势差可求场强。

电势差概念对恒定电流电路也适用，电势差常叫电压。

在恒定电流中，根据公式  $W=qU$  和  $q=It$  可求出电功和电功率公式为  $W=IUt$  和  $P=IU$ 。

在频率不高的交流电路中也应用电势差（电压）概念，但要注意两点间电压随时间变化，应该区分电压的瞬时值、最大值、有效值的意义。

**电势差与电场强度的关系** 电场强度和电势都是描述电场特性的物理量，但电场中某点的电场强度与电势没有关系，电场强度与电势的空间变化有关系。

在匀强电场中，电场强度与电势空间变化的关系为：
$$E = \frac{|U_{ab}|}{d_{ab}}$$

其中， $d_{ad}$  为沿一条电力线上两点  $a$ 、 $b$  的距离， $|U_{ab}|$  为  $a$ 、 $b$  两点电势差的绝对值， $E$  为电场强度大小。在非匀强电场中，电场强度与电势空间变化的关系为：电势沿空间降低最快的方向就是电场强度的方向，电势沿此方向单位长度上的变化等于场强的大小。

**电势高低的判定** 根据有关概念和规律判定电势高低的方法有：

(1)电势定义。a点电势定义 $U_a = \frac{W_{aP}}{q}$ ， $W_{aP}$ 为把电荷从a移到电势标准点P 电场力做的功。已知q 和  $W_{aP}$ 可求出电势、判定电势高低。

例如：把电荷  $q = -5.0 \times 10^{-9}$ 库从电势标准点P 移到 a 点电场力做功  $1.0 \times 10^{-8}$ 焦，把q 从从P 点移到 b 点要克服电场力做功  $2.0 \times 10^{-8}$ 焦。

我们根据定义求出 $U_a = \frac{W_{aP}}{q} = \frac{-1.0 \times 10^{-8}}{-5.0 \times 10^{-9}}$ 伏 = 2.0伏， $U_b = \frac{W_{bP}}{q} = \frac{2.0 \times 10^{-8}}{-5.0 \times 10^{-9}}$ 伏 = -4.0伏。 $U_a > U_b$ ，a点电势高。

(2)等势面。已知等势面的电势值，从等势面图上可直接判定电势高低。

(3)电力线。沿电力线方向电势逐渐降低。已知电力线和等势面垂直，可以判定电势高低。

(4) $W_{ab} = q(U_a - U_b)$ 。根据这个公式，已知q 和  $W_{ab}$ 可判定电势高低。

(5)电势能变化。电荷q 在a点的电势能  $E_{a} = qU_a$ ，故  $E_a - E_b = q(U_a - U_b)$ 。若已知q 和  $E_a$ 、 $E_b$ ，可判定a、b 两点电势高低。

(6)静电平衡条件。导体静电平衡时是一个等势体。例如，如图所示电荷+Q 附近有一导体，导体感应带电如图所示，尽管a 端有多余负电、b 端有多余正电，但a、b 电势相等。

(7)测量。可用电压表测量两点电势高低，或用电流表测出电流方向再判定电势高低。

**电势能** 又叫电位能，电荷q 在静电场中某点a 具有的势能  $E_a = qU_a$ ， $U_a$ 是a 点的电势。电势能数值上等于把电荷从该点移到电势零点过程中电场力做的功，或把电荷从电势零点移到该点过程中克服电场力做的功。

电势能与电场力做功的关系为： $W_{ab} = E_a - E_b = -q(U_b - U_a)$ ， $W_{ab}$ 是把电荷从a 点移到b 点时电场力做的功。这说明，电荷在电场中移动时电场力做的功等于电势能增量的负值。即：电场力做正（负）功，电势能减少（增加），电势能减少（增加）的值等于电场力做的正功（负功的绝对值）。

在电场力作用下，电荷总是从电势能大处移动到电势能小处。即在电场力作用下，正电荷从电势高处移向电势低处，负电荷从电势低处移向电势高处。电荷在电场力作用下运动所减少的电势能转变为其他形式能。

电场是一种物质，电场具有能量。电荷在外电场中具有的电势能，实质是一种电场能。

电势能与电势不同。电势能是由电荷与外电场相互作用的势能，电势是描述电场特性的物理量。 $E_a = qU_a$ 中， $U_a$ 是外电场在a 点的电势。电势能  $E_a$ 的大小与电荷q、电势  $U_a$ 两个因素有关。因此，没有电荷q 就谈不到电势能，但有电场就有电势。 $E_a = qU_a$ 有正负，a 点电势高q 的电势能不一定大，还要看电荷的正负。负电荷在电势高处电势能小，在电势低处电势能大。

**静电感应** 导体在外电场的作用下表面产生电荷的现象。如把原来不带电的导体放到电荷 $-Q$ 的电场 $E_0$ 中,则电场 $E_0$ 使导体中自由电子逆着 $E_0$ 的方向定向运动,使靠近 $-Q$ 的一端带正电、远离 $-Q$ 的一端带负电。导体表面的正负电荷在导体内部产生与 $E_0$ 方向相反的电场 $E'$ ,经过极短时间( $< 10^{-9}$ 秒),当 $E_0$ 与 $E'$ 的合电场 $E$ 等于零时,自由电子的定向运动停止,导体表面带有一定量的正负电荷 $q$ 。电荷 $-Q$ 叫施感电荷,导体表面的电荷 $q$ 叫感应电荷(或感生电荷)一般说 $q < Q$ 。感生电荷的代数和为零。

导体中自由电荷无定向运动的状态叫静电平衡状态。导体处于静电平衡状态的条件是:导体内部场强 $E=0$ ,导体表面的场强 $E$ 方向与导体表面垂直。静电平衡条件用电势表述是:导体是等势体,导体表面是等势面。

根据导体内部场强 $E=0$ ,理论上可以证明电荷都分布在导体表面,实验上可用法拉第圆桶实验验证。一般说,电荷分布在导体外表面。但对于空腔导体且空腔内部有电荷时,导体内外表面都有电荷。

利用静电感应现象可使导体带电。上图中导体在负电荷电场中感应带电后,导体电势为负,地球电势为零。导体电势比地球低,所以无论把导体哪一端接地,自由电子都将从低电势的导体流向地球,导体整体带上正电。

人体是导体,人体接近某些灵敏度高的电子仪器时,静电感应可能干扰仪器的正常工作,甚至损坏仪器。

**静电屏蔽** 利用金属空腔排除或抑制静电场影响的措施。导体在外电场中由于静电感应表面上出现感应电荷,使导体内部的合场强 $E=0$ 。如果在导体内部挖出一空腔,空腔中的合场强 $E=0$ ,空腔区域不受外界电场影响。即空腔导体利用感应电荷的电场屏蔽了外界电场,从形式上看好像外界电场不能透进空腔内部,如图(1)所示。

如果要使带电体的电场不影响外界空间,可用一接地导体空腔包围带电体。导体外表面的感应电荷全流入地而不带电,导体内表面的感应电荷产生的电场屏蔽了带电体的电场,形式上好像使带电体的电场不能透过导体壳到外部去,消除了带电体电场对外界的影响,如图(2)所示。

以上两种静电屏蔽中,后一种屏蔽导体壳必须接地,前一种屏蔽导体壳可不接地(接地也可以)。为了使电子器件、仪器免受外界干扰,常用接地金属外壳作屏蔽装置,实践说明用金属网代替金属壳效果也很好。需要屏蔽的区域大时,用金属网较简便。某些电线绝缘层外面用一层金属丝网包起来屏蔽干扰,这种电线叫屏蔽线。

**尖端放电** 带电导体尖端附近空气中发生的放电现象。带电导体静电平衡时,电荷在外表面的分布一般都不均匀,通常情况是表面凸出地方电荷密集,凹进地方电荷稀少。导体尖端处电荷非常密集,尖端附近的电场很强。这个区域内的空气分子被电离成正离子和电子,空气变成了导体。与尖端带电异号的电荷被吸引到尖端,使尖端电荷中和;同号的电荷被推离尖端形成电风。尖端放电时,尖端附近常出现光亮,并有滋滋声,这叫电晕。这种尖端放电又叫电晕放电。

高压输电线上的电晕放电使电能损耗,尖端放电还产生无线电干

扰、电视干扰及噪声干扰。为避免尖端放电要求输电导线表面光滑、导体半径不太小。一些高压设备的电极应做成光滑的球面。

尖端放电有许多应用。如静电除尘、静电喷漆、污水处理、避雷针装置。地面上树木等尖端物体的放电，对维持大气电平衡有重要作用。

金属针尖处电荷密度很大、电场很强，可制场致发射显微镜，能分辨针尖上个别原子位置，显示针尖原子的排列。

**电介质** 又叫电绝缘体，指几乎不导电的物质。电工中把常温下电阻率在  $10^7$  欧·米以上的物质叫绝缘体。如：空气、氢气；纯水、石油、变压器油；玻璃、云母、橡胶、陶瓷、塑料、金属氧化膜等。真空是最理想的绝缘体。理想电介质内不存在自由电荷，实际电介质内自由电荷很少，可忽略不计。

从微观结构看，电介质由分子组成。组成电介质的分子是中性的，内部有正负电荷，是一个复杂的带电系统。根据分子内部电结构的不同把分子分成两类：极性分子和非极性分子。极性分子是指分子内部正电荷的“中心”与负电荷的“中心”不重合，对外能产生电场。如图所示，我们把分子看成由等量异号的相隔一定距离的正负点电荷组成，这叫电偶极子，即把极性分子看成电偶极子。水、玻璃、陶瓷的分子都是极性分子。非极性分子内部正电荷的“中心”与负电荷的“中心”重合，对外不产生电场。氢、氦、聚乙烯等的分子是非极性分子。

电介质用途极大。电工技术中电介质主要用作电绝缘材料，电容器中加入电介质能增大电容。电介质的极化呈电中性的电介质在外电场作用下，电介质表面或内部出现正、负束缚电荷的现象。极性分子电介质在无外电场时，由于分子的无规则排列，即电偶极子的无规则排列，分子对外产生的电场互相抵消，电介质内部不存在电场。在外电作用下，极性分子（电偶极子）从无规则的排列变为沿外电场方向的排列，这叫极性分子的取向极化。

非极性分子电介质在外电场作用下，分子的正电荷“中心”向外电场方向发生微小位移，负电荷“中心”逆外电场方向发生微小位移，正负电荷“中心”不再重合，分子变成了电偶极子，这叫位移极化。

在平行板电容器的匀强电场中放进电介质，电介质极化后表面出现束缚电荷，在电介质内部束缚电荷产生的电场  $E'$  与  $E_0$  方向相反，合电场  $E$  减弱，便  $E' < E_0$ ，合电场  $E < E_0$ 。这是电介质与导体的很大区别（导体内部  $E=0$ ）。

电介质的性质用介电常数表征，符号是  $\epsilon_0$ 。如果真空电容器的电容为  $C_0$ ，则当电容器充以一定电量后插入电介质，电介质的极化使场强减小，两极板的电势差也减小，电容因此增大。理论和实践表明，这时的电容  $C = \epsilon_0 C_0$ ， $\epsilon_0$  是所插入电介质的介电常数。电介质的介电常数都大于 1，气体的介电常数接近于 1，如空气的  $\epsilon_0 = 1.00059$ 。某些物质的介电常数为：  
水  $\epsilon_0 = 87.8$ ，酒精  $\epsilon_0 = 27.9$ ，云母  $\epsilon_0 = 4.5 \sim 8$ ，聚苯乙烯  $\epsilon_0 = 2.2 \sim 2.8$ ，氧化钽  $\epsilon_0 = 11.6$ 。钛酸钡的介电常数可达到  $10^3 \sim 10^4$ 。

如果外电场很强，则电介质分子中的正负电荷可能被拉开变成自由电荷，电介质的绝缘性能被破坏，电介质变成了导体。在强电场下电介质变成导体的现象叫电介质的击穿。空气的击穿场强约 3 千伏/毫米，矿

物油为 15 千伏/毫米，云母为 80 ~ 200 千伏/毫米。

有的电介质具有压电性，即在机械力作用下能产生极化。有的电介质具有铁电性，即电介质被外电场极化后，去掉外电场电介质还能保持极化。这些特殊的电介质在新技术领域有广泛的应用前景。

**电场对带电粒子的加速、偏转** 电场的特性是对电荷有作用力，带电粒子在电场力作用下速度大小、方向会发生变化。

加速质量为  $m$ 、带电为  $q$  的粒子，从电场中  $a$  点运动到  $b$  点，电场力对粒子做的功使粒子动能变化。如  $a$ 、 $b$  点的电势差为  $U_{ab}$ ，电场力做

功为  $qU_{ab}$ ，根据动能定理知  $qU_{ab} = \frac{1}{2}mv_b^2 - \frac{1}{2}mv_a^2$ ，即粒子动能的变化量

等于粒子电量与电势差的乘积。这个关系式对匀强电场、非匀强电场都适用。关系式只说明速度大小的变化，粒子速度的方向可能变也可能不变。示波管和电视显像管中的电子枪，都是利用电场加速电子而得到一束高速电子流。如果忽略电子从阴极逸出的小速度，则得电子枪射出电

子的速度  $v_1$  大小为  $eU_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$ ，电压  $U_1$  叫加速电压。

**偏转** 粒子以初速  $v_0$  垂直射入匀强电场  $E$  中，粒子受恒定的电场力  $qE$  作用做类似平抛的匀变速曲线运动。粒子的运动是沿初速  $v_0$  方向的匀速直线运动和沿电场力方向的匀加速直线运动的合运动。如图所示，粒子运动规律为

$$\begin{cases} x = v_0 t \\ y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2 = \frac{1}{2} \frac{qU_2}{md} t^2 \end{cases}$$
$$\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = at = \frac{qE}{m} t = \frac{qU_2}{md} t \end{cases}$$

粒子离开电场时，运动时间  $t = \frac{L}{v_0}$

横向位移  $y = \frac{1}{2} \frac{qU}{md} \cdot \frac{L^2}{v_0^2}$  速度大小  $v = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{qU_2}{md} \frac{L}{v_0}\right)^2}$

速度方向  $v$  与  $v_0$  间夹角  $\varphi$  为  $\text{tg}\varphi = \frac{v_y}{v_x} = \frac{qU_2 L}{mdv_0^2}$

应该注意，粒子通过电场发生偏转时，不只速度方向变，速度大小也变。

我们通常处理带电粒子在电场中的加速和偏转问题时，不考虑粒子所受重力的作用。因为，对电子、质子、 $\alpha$  粒子、离子等来说，重力比电场力小很多。

**电场对带电粒子作用综合应用的思路** 带电粒子在电场中运动时遵循的规律是牛顿定律、动能定理、功能关系、动量定理、动量守恒定律及运动学公式等，因此研究带电粒子在电场中的运动实质是一个力学问题，可按力学问题的思路分析求解。所不同的是，分析粒子受力时要注意电场力  $F_E = qE$ ，正（负）电荷受力方向与场强  $E$  方向相同（相反）。

匀强电场时  $F_E = q \frac{U}{d}$ 。电场力做功  $W_E = qU$  (匀强电场、非匀强电场都适用)，对匀强电  $W_E = qEscos$ 。

例 1. 在真空中相距为  $d$  的两平行金属板 A、B 上加交流电压， $t=0$  时 A 板电势比 B 板高。B 板处有一初速为零的电子开始运动，要想使电子到达 A 板时具有最大动能，所加交变电压的频率最大不能超过多少？电子质量为  $m$ ，电量  $e$ ， $U_0$  已知。

电子在匀强电场力作用下做匀加速直线运动，要让电子到达 A 板时动能最大就要求电子从 B 到 A 过程中一直都处于加速状态。设电子从 B 到 A 的时间为  $t$ ，则  $d = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \frac{eU_0}{md} t^2$ 。

$$t = \sqrt{\frac{2md^2}{eU_0}}$$

设交变电压周期为  $T$ ，就要求  $t = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$ 。

$$\text{交变电压频率 } f = \sqrt{\frac{eU_0}{8md^2}}$$

例 2. 如下图所示，质量为  $m$ 、电量为  $-q$  的物体沿水平轨道  $ox$  运动， $o$  端有一竖直墙，物体与墙碰撞不损失机械能。匀强电场  $E$  平行轨道，物体以初速  $v_0$  从  $x_0$  点向右运动，物体受轨道大小不变的摩擦力  $f$  作用， $f < qE$ 。物体电量不变，求物体停止运动前通过的总路程  $s$ 。

物体开始时受向左的电场力  $qE$  和摩擦力  $f$  作用，物体向右匀减速运动到速度为零。在向左电场力和向右摩擦力作用下，物体向左匀加速运动与墙碰撞再向右匀减速运动。如此不断反复运动。由于摩擦力作用，物体每一次向右运动到速度为零的位置越来越靠近墙面，物体最后停在墙面  $o$  处。这过程中物体通过的总路程为  $s$ 。摩擦力做功为  $-fs$ ，电场力做功与路径无关为  $qEx_0$ 。物体初动能为  $\frac{1}{2}mv_0^2$ ，末动能为零。根据动能定理得：

$$qEx_0 - fs = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

$$s = \frac{mv_0^2 + 2qEx_0}{2f}$$

**示波管** 能在荧光屏上显示电信号随时间变化的波形以便观察或照相的电子束管。如图(1)所示，内部是真空的示波管主要由三部分组成：电子枪、偏转电极、荧光屏。电子枪由灯丝、阴极、栅极、第一阳极和加速电极组成。灯丝通电流加热阴极，阴极发射出电子，电子被加速电极的高电压加速，从电子枪射出一细束高速电子流。栅极与第一阳极起控制作用。偏转电极由两对平行的互相垂直的平板组成，加上电压后可控制电子束水平和竖直方向的偏转。电子束打到荧光屏上发出荧光。

设示波管的加速电压为  $U_1$ ，则电子枪射出电子速度  $v_0$  为  $eU_1 = \frac{1}{2}mv_0^2$ ，

$m$ 、 $e$  是电子质量、电量。

设偏转电极长  $l$ ，两极间隔为  $d$ ，电压为  $U_2$ 。电子通过偏转电场的  
时间  $t = \frac{l}{v_0}$ ，故电子的横向位移  $y_1$  为

$$y_1 = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \frac{eU_2}{md} \left(\frac{l}{v_0}\right)^2$$

电子速度偏转方向  $\phi$  为  $\text{tg}\phi = \frac{v_y}{v_x} = \frac{eU_2l}{mdv_0^2} = \frac{U_2l}{2U_1d}$ 。

电子打到荧光屏上距屏中心的位移  $y = y_1 + y_2$ ，由图(2)知  $y_2 = D\text{tg}\phi$   
 $= \frac{U_2lD}{2U_1d}$ 。

$$y = \frac{U_2l}{2U_1d} \left(\frac{1}{2} + D\right) = \left(\frac{1}{2} + D\right)\text{tg}\phi$$

这说明，无论加速电压  $U_1$ 、偏转电压  $U_2$  取何值，电子好像都是从偏转电极中心射出。

在偏转电压  $U_2$  一定时，电子在屏上的位移  $y$  越大说明示波管的灵敏度越高。要增大  $y$  可减小  $U_1$ 、 $d$ ；增大  $l$ 、 $D$ 。

**电容** 描述孤立导体或两个导体容纳电荷性能的物理量。

(1)孤立导体的电容 孤立导体带电为  $Q$  时电势为  $U$ ，理论和实践表明  $Q$  与  $U$  之间是正比关系， $\frac{Q}{U}$  是一恒量，对不同导体恒量的值不同。孤立导体的电容  $C$  定义为  $C = \frac{Q}{U}$ ，电容  $C$  决定于导体的形状、大小、导体越

大  $C$  也越大。孤立导体球的电容  $C = \frac{R}{K}$ 。 $C$  在数值上等于导体电势升高 1

伏时所需要的电量，它反映孤立导体容纳电荷的能力。电容的单位是法 (F)，这单位很大，常用微法 ( $\mu\text{F}$ )、皮法 (pF) 等单位。地球作为孤立导体电容  $C$  约  $7.0 \times 10^2 \mu\text{F}$ 。

(2)电容器的电容 两个互相绝缘的导体带有等量异号电荷  $Q$  时，导体间的电势差为  $U$ ，理论和实践表明  $Q$  与  $U$  成正比，定义电容器的电容  $C = \frac{Q}{U}$ 。 $C$  数值上等于导体间电势差增加 1 伏时所需的电量， $C$  反映电容器容纳电荷的能力。电容器的电容与两导体的大小、形状、相对位置及

导体间电介质的介电常数等有关。平行板电容器的电容  $C = \frac{\epsilon S}{4\pi Kd}$ ，其中

$S$  是平行板的正对面积， $d$  是两板间距离， $\epsilon$  是两板间电介质的介电常数， $K$  是静电力恒量。电容器的电容一般以微法、皮法为单位。

两根导线间也有电容，叫分布电容。一个线圈的线匝之间也构成电容，叫“匝间电容”。

电容器电量增加叫充电，电量减少叫放电。

正对面积为  $S$ 、相距为  $d$  的真空平行板电容器电容为  $C$ ，若电容器充

电到电压为  $U$ 、电量为  $Q$ ，则  $Q=CU$ ，平行板间的电场为匀强电场  $E$ ， $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{S}$ 。如果保持电量  $Q$  和正对面积  $S$  不变，增大板间距离  $d$ ，则由

于电容  $C$  减小电压  $U$  要增大，但场强  $E$  不变。如果保持  $U$ 、 $S$  不变而增大  $d$ ，则由于  $C$  减小  $Q$  也要减小，这时场强  $E$  减小。

**电容器** 由两个互相绝缘且靠得很近的导体组成，这两个导体称为极板，带有等量异号电荷。

实用电容器的种类很多，可根据不同特点进行分类。

根据电容极板形状分为：平行板电容器、球形电容器、柱形电容器等。

根据电容器极板间电介质分为：真空电容器、空气电容器、云母电容器、纸介电容器、陶瓷电容器、聚四氟乙烯电容器、电解电容器等。

根据电容器电容是否变化分为：固定电容器、可变电容器、半可变电容器等。

电容器的两个重要指标是：电容值和工作电压（耐压）。

电容器在电工、电子技术中应用很广。大型的电力电容器用来提高电力设备的效率。电子技术中常用电容器来产生电磁振荡、改变波形、滤波、耦合等。电容器充电后储藏有电能。放电时强大的电流和火花可用来熔焊金属等。

#### 电容器的串联和并联

(1) 串联把几个电容器一个接一个地联在一起。串联电容器的等效电容  $C$ 、电压  $U$ 、电量  $Q$  与每个电容器的电容、电压、电量的关系为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots$$

电容器串联后电容减小，每个电容器上的电压只是总电压的一部分。通常利用串联电容器来提高耐压。(2) 并联把几个电容器的一个极板联在一起，另一个极板也联在一起。并联电容器的等效电容  $C$ 、电压  $U$ 、电量  $Q$  与每个电容器的电容、电压、电量的关系为

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

通常利用电容器并联来增大电容。

**静电计** 测量静电场中电势差的仪器。最简单的一种是验电器，构造如图(1)所示，金属杆上端有一金属球，下端有一对金属箔。金属箔下垂。当容器圆筒接地，金属球与带电体接触时，金属箔因带同种电互相排斥而张开，带电体电势越高金箔张角越大，可用来测量带电体的电势。

在验电器基础上制成的静电计如图(2)所示，金属箔改为可转动的金属针。静电计能测量两导体间的电势差。如测量电容器的电势差时，把电容器两极板分别跟金属球和圆筒连接，根据指针偏转角度可知电势差。

实际应用的静电计制造精密，有低压式静电电压表、高压式静电电压表和象限静电计等，可测量直流电压，也可测交流电压的有效值。

### 静电的应用和防护

(1)静电应用 利用静电感应、强电场引起的气体放电等效应，使带电微粒在电场力作用下运动。在电力、机械、纺织、轻工、航空航天及高技术领域有广泛应用。

静电除尘、分选 利用强电场使空气电离，悬浮的尘粒带电后在电场力作用下奔向电极，尘粒被吸附从烟气中分离出来。可捕集 0.01 微米以上微粒。强电场还用来进行微粒的分选。

静电喷涂 强电场引起的电晕放电使涂料微粒带电后涂敷在接地金属物体上。静电喷漆漆液的利用率可高达 80~90%。静电喷雾、喷粉机用于农业。

静电纺纱 静电场使纤维伸直、排列和凝聚，形成一种新的纺纱技术。

静电复印 现已广泛应用。

高技术领域应用静电火箭发动机、静电轴承、静电陀螺仪、静电透镜等。

(2)静电防护 静电积累能引起火灾、爆炸，使人身受到电击，电子器件失效、损坏等。应设法抑制静电的产生，加快电荷的泄漏，使积累的电荷中和等。

通常情况下，人体带电电势为 1 千伏时的放电无任何感觉，4~5 千伏时的放电能见到电火花有明显的痛感，10 千伏时的放电整个手有痛感、有电流流过感觉。

电流 也叫电流强度，电荷的定向运动。若在时间  $t$  内通过某一面积的电量为  $q$ ，则通过该面积的电流  $I = \frac{q}{t}$ 。如果电流是变化的，则定义

$I = \frac{dq}{dt}$  ( $t > 0$ )。电流数值上等于单位时间内通过某一面积的电量。电

流的单位是安(A)。在国际单位制中，电流是基本单位之一。

产生电流的条件有二：(1)有能自由运动的自由电荷（叫载流子）；(2)有使电荷运动的力（电压、电动势提供这种力）。

金属导体中的载流子是自由电子，电解溶液中的载流子是正、负离子，导电气体中的载流子是电子和离子，半导体中的载流子是自由电子和空穴。我们规定正电荷运动的方向为电流的方向，则负电荷运动的方向与电流方向相反。

从微观角度看，设单位体积中自由电荷数为  $n$ ，电荷带电量为  $q$ ，定向运动速度为  $v$ ，导体横截面积为  $S$ ，则  $I = nqSv$ ，对金属导体  $I = neSv$ ，对电解液  $I = n_+q_+sv_+ + n_-q_-sv_-$ ，前一项是正电荷运动形成的电流，后一项是负电荷运动形成的电流。例如：电解槽中 1 秒内通过横截面的正离子的电量为 4 库，通过负离子的电量为 3 库，则电流为 7 安，方向与正离子运动方向相同。

电子绕原子核的高速运转可等效一环形电流，若电子线速度为  $v$ ，

圆周半径为  $r$ ，电子电量为  $e$ ，则等效电流  $I = \frac{ve}{2\pi r}$ 。

大小、方向都不随时间变化的电流叫恒定电流，又叫稳定电流。方向不随时间变化的电流叫直流电流。大小、方向，都随时间变化的电流叫交流电，市电按正弦规律变化叫正弦交流电。

恒定电流的特点是：电流是闭合的，不可能中断。外电路上恒定电流的方向是从电源正极到负极，内电路上则是从电源负极到正极。对几个恒定电流相交的支点来说，流进支点的电流等于流出支点的电流。

电流产生的效应有：磁效应、热效应、化学效应等。电流通过电阻为零的超导体不产生热效应，电流通过金属导体不产生化学效应，但电流总要产生磁效应。电流产生磁场是电流的本质特征。

**欧姆** 德国物理学家(1787~1854)。欧姆在上大学期间曾因学费昂贵而退学，后经自学参加考试获哲学博士学位。欧姆曾担任过中学数学、物理老师。欧姆在傅立叶热传导研究工作的启发下研究电流的规律，他猜想与导热杆中热流量和两端的温度差成正比的规律相似，通过导体的电流也与导体两端的某种力（他叫电动力）成正比。为了进行实验研究，欧姆接受他人建议，用塞贝克发明的温差电池做电源。为了解决精确测量电流的困难，欧姆巧妙地把电流的磁效应和库仑扭秤结合起来，制造了电流扭力秤。1826年欧姆通过不同材料的导线所做的实验，归纳

得出规律 $X = \frac{a}{b+x}$ ，X表示电流，a相当于电动势，b相当于电池内阻，

X是导线长度（导线粗细相同）相当于外电阻。后来他又简化为 $X = \frac{A}{L}$ ，

X是电流I，A是电压U，L是电阻R。1827年欧姆发表《伽伐尼电路：数学研究》一书，从理论上论证了欧姆定律。欧姆的研究成果当时未受到重视，还受到一些人的攻击。1841年英国皇家学会授予以欧姆当时科学界的最高荣誉：科普利奖章，欧姆的工作才逐渐得到承认。

欧姆还从事结晶学和音响学方面的研究。

**欧姆定律** 关于导体两端电压与电流关系的定律。内容为：通过导体的电流I与导体两端的电压U成正比， $\frac{U}{I}$ 就是导体的电阻。用公式表

述为： $I = \frac{U}{R}$ 。又叫部分电路欧姆定律，是欧姆发现的，是电学的基本

实验定律之一。实验证明：对一个导体来说电流与电压成正比， $\frac{U}{I} =$

恒量；对不同导体恒量的值不同。 $\frac{U}{I}$ 的值反映导体阻碍电流的能力，

定义为电阻R。欧姆定律用I~U图象表示为一条过原点的直线，直线

的斜率等于电阻的倒数， $\text{tg}\varphi = \frac{1}{R}$ 。

欧姆定律对金属导体和液体导体适用，对半导体、气体、电子真空管等不适用。欧姆定律适用的导体，其电阻是一定值，不随电流、电压变化，这叫线性电阻。欧姆定律是对一段纯电阻在某一时刻的电流、电压、电阻间的关系说的，应用欧姆定律时要明确：哪一段电路，哪一时刻的电流、电压、电阻。

**电阻** 描述导体阻碍电流通过能力的物理量。导体电阻  $R$  定义为通过电流  $I$  时导体两端电压  $U$  与电流  $I$  之比，即  $R = \frac{U}{I}$ 。  $R$  的单位是欧（ $\Omega$ ）。

导体电阻也是描述导体导电性能的物理量。

如果导体两端电压与通过电流的比值为—恒量与电流、电压无关，则导体的电阻值恒定，叫线性电阻。如果导体电压与电流的比值随电流、电压变，则导体电阻值不恒定，叫非线性电阻。晶体管、热敏电阻、光敏电阻等都是非线性电阻。在  $I \sim U$  图象上，线性电阻是一条直线。非线性电阻是一条曲线。

电流通过导体时要产生焦耳热  $Q$ ， $Q = I^2 R t$ ， $I$  为电流， $R$  为电阻、 $t$  为通电时间。电流产生焦耳热的过程就是电能转化为内能的过程。从微观角度看，金属的电阻是由自由电子的定向运动与金属空间点阵上的微粒发生碰撞形成的，这种碰撞阻碍了电子的定向运动，使点阵微粒的热运动加剧。

导体的电阻由导体的性质等决定，不应该根据定义  $R = \frac{U}{I}$ ，错误认为电阻  $R$  与电压  $U$  成正比、与电流  $I$  成反比。电阻  $R$  与导体的形状、大小、材料等因素有关。对于一定材料制成的横截均匀的导体说，导体电阻与导体长度成正比、与导体横截面积成反比。写成等式是  $R = \frac{l}{S}$ ，其

中  $l$  表示长度， $S$  表示横截面积， $\rho$  是反映材料性质的叫电阻率，不同材料电阻率不同。公式表述的关系叫电阻定律。

**电阻率** 表征材料导电性能的物理量，符号为  $\rho$ 。电阻率越小导电性能越好。根据电阻定律  $R = \frac{l}{S} \rho$ ，其中  $R$  表示电阻， $l$  表示导体长度， $S$  表示导体横面积。电阻率  $\rho$  的单位是欧·米。

电阻率  $\rho$  与电阻  $R$  不同。 $R$  反映的是导体的性质， $R$  与导体长度、横截面积和材料性质有关。电阻率反映材料的性质，同一种材料做成不同粗细、不同长度的导线电阻率相同电阻不同。

不同材料的电阻率值相差很大，导体的电阻率数量级为  $10^{-8}$  欧·米，绝缘体（电介质）的电阻率在  $10^7$  欧·米以上。常温下导电最好的材料是银，20℃ 时银的电阻率为  $1.59 \times 10^{-8}$  欧·米。其次是铜，电阻率为  $1.72 \times 10^{-8}$  欧·米。熔凝石英的电阻率很大为  $7.5 \times 10^{17}$  欧·米。合金的电阻率较大，康铜为  $4.8 \times 10^{-7}$  欧·米，镍铬铝铁约为  $1.33 \times 10^{-6}$  欧·米。

**电阻温度系数** 表征材料电阻率随温度变化的物理量。材料的电阻率与温度有关，实验说明：纯金属的电阻率随温度变化的规律是  $\rho_t = \rho_0 (1 + at)$ ，式中  $\rho_0$  是 0℃ 的电阻率， $\rho_t$  是  $t$ ℃ 的电阻率， $t$  是温度（ $^\circ\text{C}$ ）， $a$  是电阻温度系数， $a$  的单位是  $1/^\circ\text{C}$ 。不同材料电阻温度系数不同，大多数纯金属的电阻温度系数  $a = \frac{1}{273} = 0.00367 / ^\circ\text{C}$ ，可粗略认为  $a$  在 0.4%

左右。铜的电阻温度系数为  $0.00393 / ^\circ\text{C}$ ，钨为  $0.00450 / ^\circ\text{C}$ 。碳的电阻

温度系数为负值是 $-5 \times 10^{-4}$  / 度,  $a < 0$  即温度  $t$  升高时电阻率 减小。半导体和绝缘体的电阻温度系数都为负值, 特别是半导体, 温度增高不太多时电阻率会急剧减小。康铜和锰铜的电阻温度系数约  $10^{-5}$  / 度。

根据电阻定律  $R = \rho \frac{L}{S}$ , 对于一定的导线有  $R = R_0(1 + at)$ ,  $R_0$  为  $0$  的电阻。康铜、锰铜的电阻温度系数小, 电阻值随温度变化很小, 所以用来做标准电阻。白炽灯泡的钨丝, 常温下的电阻设为  $R_1$ , 正常发光时钨丝温度为 2000 多摄氏度, 钨的电阻温度系数  $a=0.45\%$ , 所以正常发光时的电阻  $R = 10R_1$ , 即灯泡发光时的热态电阻是常温下的电阻值的 10 倍。灯泡常温下电阻值小, 刚接通电路时电流很大, 灯丝温度急剧升高, 为了保护灯泡和设备应减少开关次数, 我们通常说“220V40W”灯泡的电阻是 1210 欧, 这是灯泡正常发光时的热态电阻, 常温下用欧姆表测电阻值时得到的结果要小得多。

**超导体** 在一定低温条件下电阻为零和具有排斥磁力线性质的导体。1911 年荷兰物理学家昂尼斯发现水银在 4.2K 附近电阻完全消失的超导电性现象。1933 年迈斯纳发现超导体具有完全排斥磁力线的性质。零电阻性和完全抗磁是超导体的两个突出特性。在超导体中用电磁感应产生电流后, 这种“持续电流”能够维持几年而毫不减小, 超导体表现出完全没有电阻。超导体内部磁场为零, 磁力线不能进入超导体内部。

超导材料变成超导体需要一定温度, 叫临界温度  $T_c$  (或转变温度), 温度在  $T_c$  以下是超导体, 在  $T_c$  以上是普通导体。不同超导材料的临界温度不同, 但都非常低, 要用液氮才能获得这样低的温度。长期以来, 人们努力提高临界温度, 到 1986 年前才达到 23.2K, 收效不大。1986 年瑞士物理学家米勒和德国物理学家贝德诺尔茨发现氧化物陶瓷的临界温度为  $T_c=35K$ , 这是一个突破。1987 年世界出现超导热, 中、美、日的科学家发现钇——钡——铜氧化物的临界温度  $T_c$  高达 100K 左右, 我国科学家赵忠贤发现 100K 以上的超导材料。1990 年发现转变温度  $T_c$  高达 160K。利用液氮 (78K) 就可获得这样的低温, 成本大为降低。

现在已发现的超导材料有 28 种元素, 几千种合金和化合物, 它们在一定的低温条件下可变成超导体。超导体有广泛的应用: (1) 用超导体做成超导线 (没有电阻的电线)。超导线可以大大减少输送电能过程中的损耗, 可用来制造产生强磁场的超导电磁铁, 制造超导电机等。(2) 利用完全抗磁性制造无摩擦的螺仪、轴承、磁悬浮列车、轮船等。(3) 利用新发现的超导体的约瑟夫森效应于高新尖技术上。一般认为, 超导体的广泛应用将在广阔的技术领域里引起一场革命。

**电阻的串联** 把电阻一个跟着一个成串地联接起来, 中间没有分岔路, 在电源作用下电流只有一条道路。

如图所示, 电阻串联电路的最大特点是: 电流只有一条道路, 通过各个电阻的电流相等, 即  $I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots\dots$ 。

电阻串联电路的另一特点是: 电路两端电压等于各个电阻上电压之和, 即  $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots\dots$ 。根据各个电阻的电流相等和欧姆定律知, 各个电阻上分得的电压与该电阻值成正比, 即  $U_1 : U_2 : U_3 : \dots\dots = R_1 : R_2 :$

$$R_3 : \dots, \text{ 或 } \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} \dots I_0.$$

电阻串联电路等效于一个电阻 $R$ ,  $R = \frac{U}{I}$ ,  $U$ 为电路两端电压,  $I$ 为通过电路的电流。根据电流、电压特点和欧姆定律知, 等效电阻等于各个电阻值之和, 即  $R=R_1+R_2+R_3+\dots$ 。

电阻串联电路消耗的电功率等于各个电阻消耗的电功率之和, 即  $P=P_1+P_2+P_3+\dots$ 。根据各电阻电流相等知, 各个电阻消耗的电功率与该电阻值成正比, 即  $P_1 : P_2 : P_3 \dots = R_1 : R_2 : R_3 : \dots$ , 或

$$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \frac{P_3}{R_3} \dots = I^2. \text{ 串联电路的电功率 } P \text{ 也可用 } P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \text{ 计算。}$$

**电阻的并联** 把几个电阻的一端都联接在同一点, 另一端都联接在另一点, 在电源作用下它们两端的电压都相同。

如图所示, 电阻并联电路的最大特点是: 电路两端电压与每个电阻上的电压都相等, 即  $U=U_1=U_2=U_3=\dots$ 。

电阻并联电路的另一特点是: 通过电路的总电流等于通过各个电阻电流之和, 即  $I=I_1+I_2+I_3+\dots$ 。根据各电阻电压相等和欧姆定律知,

$$\text{各电阻分得的电流与该电阻值成反比, 即 } I_1 : I_2 : I_3 \dots = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}, \text{ 或 } I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = \dots = U.$$

电阻并联电路等效于一个电阻 $R$ ,  $R = \frac{U}{I}$ ,  $U$ 为电路两端电压,  $I$ 为通过电路的总电流。等效电阻的倒数等于各个电阻倒数之和, 即  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$ 。两个电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 并联的等效电阻  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ ,

$R$ 既小于 $R_1$ 又小于 $R_2$ , 即并联的等效电阻比每个电阻值都小, 并联电阻越多等效电阻值越小。

电阻并联电路消耗的电功率等于各个电阻消耗的电功率之和, 即  $P=P_1+P_2+P_3+\dots$ 。根据各电阻电压相等知, 各个电阻消耗的电功率

与该电阻值成反比, 即  $P_1 : P_2 : P_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots$ , 或  $P_1 R_1 = P_2 R_2 = P_3 R_3 = \dots = U^2$ 。电阻并联电路的电功率  $P$  也可用  $P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$  计算。

**电阻的混联** 既有电阻串联又有电阻并联。

在复杂电路中分清电阻混联关系的关键在于识别各电阻的串联、并联关系。首先, 应该明确电阻的串联、并联都是对电源或电路的某两端来说的, 两个端点不明确会造成混乱。其次, 要依据串、并联的特点:

(1)通过同一电流的各个电阻是串联关系；(2)联接两个共同的电流分岔点间的各个电阻是并联关系。具体措施可采取逐步解决的办法，使电路逐步得到整理最后画成清晰的串、并联电路。

例如，图(1)所示电路中  $R_1=R_2=R_3=R_4$ ，已知  $A_1$ 、 $A_2$  的读数均为 0.6 安，求  $A_3$  读数是多少？

把有关点编上号。先考虑  $A_1$ 、 $A_2$  不存在用导线代替，则 a 与 2 是同一个点，1 与 3 是同一个点。电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  是并联关系，然后再与  $R_4$  串联，我们整理后电路如图(2)所示。

再考虑  $A_1$  串接入 a、2 之间， $A_2$  串接在 1、3 之间，电路如图(3)所示。

根据整理出的电路图知  $A_1$  测的是通过  $R_1$ 、 $R_3$  的电流， $A_2$  测的是通过  $R_1$ 、 $R_2$  的电流。通过  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的电流相等，都是 0.3 安。所以  $A_3$  的读数是 0.9 安。

**分压电路** 利用电阻串联从总电压中取得部分或全部电压的电路。如图(1)所示，总电压为  $U$ ，电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  串联的等效电阻  $R = R_1 + R_2 + R_3$ 。电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  上分得的电压为  $U_1 = \frac{R_1}{R} U$ ， $U_2 = \frac{R_2}{R}$

$$U, U_3 = \frac{R_3}{R} U。$$

例如，电子技术中常用可变电阻组成分压电路如图(2)所示，可变电阻叫“电位器”。当滑动头调节到下端电阻为  $R_1$  时，输出电压  $U_{cd} = \frac{R_1}{R} U_{ab}$ 。  $R_1$  从  $0 \sim R$  变化，故电压  $U_{ab}$  的变化范围为  $0 \sim U_{ab}$ 。

应该注意，如果在 c、d 端接上负载电阻  $R_L$ ，则  $U_{cd} \neq \frac{R_1}{R} U_{ab}$ 。这时

$$U'_{cd} = \frac{\frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L}}{(R - R_1) + \frac{R_1 R_L}{R_1 + R_L}} U_{ab} =$$

$$\frac{R_1 U_{ab}}{R + R_1(R - R_1) / R_L} < U_{ab}。即加上负载电阻后输出电压下降， $R_L$  越小$$

电压下降越多。

**分流电路** 利用电阻并联从总电流中分出部分电流的电路。如图所示电路，总电流为  $I$ ，电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  并联的等效电阻为  $R$ ，则通过

$$各电阻的电流为  $I_1 = \frac{R}{R_1} I$ ， $I_2 = \frac{R}{R_2} I$ ， $I_3 = \frac{R}{R_3} I$ 。$$

例如，在电流表上并联电阻  $R$ ，量程扩大为原来的  $n$  倍。如果再并联电阻  $R$ ，量程扩大为原来的几倍？

$$并联  $R$  后通过电流表内阻  $r$  的电流与通过  $R$  的电流的比为  $\frac{1}{n-1} = \frac{R}{r}$ 。$$

如果再并联R则相当于在内阻r上并联电阻 $\frac{R}{2}$ ，设量程扩大为原来的 $n_x$

倍，则 $\frac{1}{n_x - 1} = \frac{R/2}{r}$ 。所以 $n_x = 2n - 1$ 。

**电功率** 单位时间内电路中电场驱动电流所做的功。对一段恒定电流电路来说，若电路两端电压为U，电流为I，在时间t内通过电路的电量 $q = It$ ，电场力做的功 $W = qU = ItU$ ，所以电功率 $P = \frac{W}{t} = IU$ 。对交

流电路，若该段交流电路为纯电阻R的电路，则电功率 $P = iu$ ， $p$ 、 $i$ 、 $u$ 都是瞬时值，P叫瞬时电功率， $i$ 、 $u$ 随时间变，瞬时电功率P也随时间变。用有效值表示为 $P = IU$ ，P是一个周期内的平均电功率。若该段交流电路不是纯电阻电路， $P = iu$ 仍成立，但 $P \neq IU$ 。电功率的单位是瓦(W)、千瓦(kW)。

某段电路中电场力做功，意味着该段电路中发生电能与其他形式能的转换，电功率说明电能与其他形式能的转换速率（即单位时间内的能量转换）。

(1)电路是纯电阻时，消耗的电能全部转换为电路的内能，

$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ ，其中P为电功率，U为电路两端电压，I为通过电路

的电流，R为电路的电阻。(2)电路是电动机时，在正常情况下消耗的电能大部分转换为机械能，剩下一部分转换为电路内能， $P = IU = I \epsilon_{反} + I^2 R$ ，其中 $\epsilon_{反}$ 是电动机工作时产生的感应电动势，R是电路的电阻（包括电动机的电阻和电路其他部分的电阻）。

(3)电路是电解槽时，消耗的电能一部分转换为化学能，另一部分转换为电路（主要是电解槽）的内能， $P = IU = I \epsilon_{化} + I^2 R$ ，其中 $\epsilon_{化}$ 是电解槽的电动势，R是电解槽的电阻。

应该注意，电功率的基本公式是 $P = IU$ 。 $P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ ， $P = I \epsilon_{反} + I^2 R$ ， $P = I \epsilon_{化} + I^2 R$ 都只在特殊情况下成立。

**焦耳定律** 关于导体中通过电流与所产生的热量间的关系的定律。焦耳于1840年根据实验发现：电流I通过导体产生的热量Q（叫焦耳热）与电流I的二次方成正比。用公式表述为： $Q = I^2 R t$ ，Q的单位为焦。单位时间内产生的热量叫热功率，对恒定电流 $P_{热} = I^2 R$ ，对交流电的瞬时功率 $P_{热} = i^2 R$ ， $i$ 是电流的瞬时值， $i$ 、 $p_{热}$ 随时间改变。一个周期内的平均功率 $P = I^2 R$ ，I是交流电流的有效值。

对纯电阻电路、有电动机的电路、有电解槽的电路、电源的内电路等不同类型的电路来说，电路中的能量转换关系各不相同，但电流通过这些电路产生的热量都可用 $Q = I^2 R t$ 计算，这说明焦耳定律是普遍成立的。电阻R将电能转换为内能是电阻的基本原理之一，我们可根据这一

属性定义电阻 $R = \frac{P}{I^2}$ 。电阻的这个定义与根据欧姆定律的电阻定义 $R =$

$\frac{U}{I}$ 是一致的。

从经典电子论看，电流通过电阻必然要产生热量。对金属导体说，电场对自由电子的定向运动做的功使电子动能增加。通过电子与点阵粒子的碰撞，电子的动能转换为点阵粒子规则振动的能量（即内能）。

电流通过导体产生的热效应有许多应用，焦耳定律是设计电热设备（电炉、电烘箱等）、电气照明设备及各种电气设备温度升高的重要公式。保险丝也是利用电流热效应工作的。

电流热效应也有不利的一面，如输电过程中的热损耗，电动机工作时温度过高会损坏设备等。

**电动势** 电源内部的非静电力把单位正电荷从电源负极经内电路移动到正极过程中做的功。电动势的符号是  $\mathcal{E}$ ，单位是伏(V)。电源是一种把其他形式能转变为电能的装置。要在电路中维持恒定电流，只有静电力不够，还需要有非静电力。电源提供非静电力，把正电荷从低电势处移到高电势处，非静电力推动电荷做功的过程，就是其他形式能转换为电能的过程。电动势是表征电源产生电能的性能的物理量。例如：电动势为 6 伏说明电源把 1 库正电荷从负极经内电路移动到正极时非静电力做功 6 焦。有 6 焦的其他形式能转换为电能。

当电源的外电路断开时，电源内部的非静电力与静电力平衡，电源正负极两端的电压等于电源电动势。当外电路接通时，端电压小于电动势。

不同电源非静电力的来源不同，能量转换形式也不同。化学电动势（干电池、钮扣电池、蓄电池等）的非静电力是一种化学作用，电动势的大小取决于化学作用的种类，与电源大小无关，如干电池无论 1 号、2 号、5 号电动势都是 1.5 伏。发电机的非静电力是磁场对运动电荷的作用力。光生电动势（光电池）的非静电力来源于内光电效应。压电电动势（晶体压电点火、晶体话筒等）来源于机械功造成的极化现象。

**内电压** 电源对外电路供电时，通过电源的电流与电源内电阻的乘积。内电压又叫电源内电路的电压降。一般说，内电压不等于内电路两端的电压。通常认为电源内电阻  $r$  为一定值，故电流  $I$  越大，内电压  $Ir$  也越大。当电源外电路断路时，电流  $I=0$ ，内电压  $Ir=0$ 。电源外电路短路时，电流  $I = \frac{\mathcal{E}}{r}$ ，内电压  $Ir = \mathcal{E}$ 。

根据闭合电路欧姆定律知，电源电动势等于电源端电压与内电压之和，即  $\mathcal{E} = U + Ir$ ， $\mathcal{E}$  为电动势， $U$  为端电压。

**端电压** 电源正负极间的电压。端电压等于把单位正电荷从正极移到负极时电场力做的功。通过电源的电流为零时，端电压  $U$  等于电动势，我们常利用这一特点测量电动势。

电源放电时，若外电路为电阻  $R$ ，通过电路的电流为  $I$ ，则端电压  $U=IR$ 。根据闭合电路欧姆定律知端电压等于电动势减内电压，即  $U = \mathcal{E} - Ir = \mathcal{E} - \frac{\mathcal{E}r}{R+r}$ 。端电压随电流的增大线性减小，端电压随外电阻的增大

而增大， $U - I$  图象和  $U - R$  图象如图所示。 $U - I$  图象直线斜率的负值等于电源内电阻。应该注意，若外电路的用电器不是纯电阻  $R$ ，而是电动机、电解槽等，则端电压  $U < IR$ ， $U = \mathcal{E} - Ir$  仍成立。当通过电源的电流  $I=0$  时，如外电路断路时，内电压为 0， $U = \mathcal{E}$ 。

电源充电时，端电压等于电动势加内电压，即  $U = \mathcal{E} + Ir$ 。

例如，电源对外电阻供电，当外电阻  $R$  减少使端电压减小 0.4 伏，电流  $I$  增大 2 安。我们可由此求出电源内电阻  $r$ 。

我们根据  $U_1 = \mathcal{E} - I_1 r$  和  $U_2 = \mathcal{E} - I_2 r$  得  $U_1 - U_2 = (I_2 - I_1)r$ ，做

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = \frac{0.4}{2} \text{ 欧} = 0.2 \text{ 欧}。$$

$$\text{也可根据图中 } U - I \text{ 图象直线斜率求得 } r = -\frac{U}{I} = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ 欧}$$

**闭合电路欧姆定律** 通过闭合电路的电流等于电路中的电源电动势除以闭体电路总电阻。若电源电动势为  $\mathcal{E}$ ，电源外电路的电阻为  $R$ ，

内电阻为  $r$ ，则闭合电路的电流  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ 。这是电学基本定律之一。定律

也可表述为  $\mathcal{E} = IR + Ir$  或闭合电路的电动势等于端电压与内电压之和。闭合电路欧姆定律说明：通过闭合电路的电流由电动势和闭合电路的总电阻决定。恒定电流一定是闭合的，定律从整体上说明了电流的决定因素。部分电路的欧姆定律说明：一段电阻电路中的电流，由电阻两端的电压和电路的电阻决定。

**电源的串联、并联** (1) 串联将一个电源的负极与下一个电源的正极相连，依次结成一串。几个电源串联后等效于一个电源，这个等效电源的电动势等于各个电源电动势之和，等效电源的内电阻等于各个电源内电阻之和。即

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \dots$$

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \dots$$

若  $n$  个相同的电源串联起来，每个电源的电动势为  $\mathcal{E}_0$ 、内电阻为  $r_0$ ，则等效电源的电动势  $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_0$ 、内电阻  $r = nr_0$ 。

(2) 并联将几个电源的正极连在一起，负极另连在一起。通常是将电动势和内电阻都相同的电源并联。这时等效电源的电动势就等于一个电源的电动势，内电阻的倒数等于各个电源内电阻倒数之和。 $n$  个相同电源并联时， $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0$ ， $r = \frac{r_0}{n}$ 。

我们实际应用的电源一般说内电阻较小，内部电压降不大。电源串联时等效电源的端电压  $U$  与电动势  $\mathcal{E}$  相差不多，而  $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_0$ ，所以在需要比一个电源电动势高的电压时，我们常把电源串联起来使用。

一个电源允许通过的电流不能太大，而实践中有时需要较强的电流，对需要大电流的负载我们可用电源并联供电，因为几个相同电源并

联时，若供给负载的电流是  $I$ ，通过每个电源的电流  $I_0 = \frac{I}{n}$ 。

如果负载需要较高电压和较大电流，我们可同时把电源串联起来和并联起来供电。若把  $m$  个相同电源  $\mathcal{E}_0$ 、 $r_0$  并联起来，再把  $n$  组并联电

源串联起来，则等效电源的电动势  $\mathcal{E} = n\mathcal{E}_0$ ，内电阻  $r = n \frac{r_0}{m}$ 。供给负载的

电源若为  $I$ ，则通过每个电源的电流  $I_0 = \frac{I}{m}$ 。

**电源电动势和内电阻的测定** 电动势和内电阻是反映电源重要特征的两个物理量。测量电动势 和内电阻  $r$  的方法很多。

(1) 伏安法 (见“伏安法测电阻”)

(2) 伏欧法用电压表和定值电阻测量  $\epsilon$ 、 $r$  的电路如右图，用不同的定值电阻测出端电压，则

$$\begin{cases} \epsilon = U_1 + \frac{U_1}{R_1} r \\ \epsilon = U_2 + \frac{U_2}{R_2} r \end{cases}$$

联立解得  $\epsilon$  和  $r$ 。由于电压表的电阻不是无穷大，测出的电动势、内电阻都比真实值小。

(3) 安欧法用电流表和定值电阻测量  $\epsilon$ 、 $r$  的电路如右图，用不同的定值电阻测出电路中电流，则

$$\begin{cases} \epsilon = I_1 R_1 + I_1 r \\ \epsilon = I_2 R_2 + I_2 r \end{cases}$$

联立解得  $\epsilon$  和  $r$ 。由于电流表的电阻不为零，测出的电动势虽是准确的，但内电阻比真实值大。

(4) 电势差计 (补偿法) 用电势差计准确测量电动势的电路如右图所示。AB 是一根均匀的电阻丝， $\epsilon_s$  是标准电池、电动势已知， $\epsilon_x$  是待测电动势。闭合电键  $K$ ， $K_1$ 、 $K_2$  拨向 1 时调节滑动头到 C 点使通过电流计的电流为零，这时 A、C 间电压等于电动势  $\epsilon_s$ 。再把  $K_1$ 、 $K_2$  拨向 2，调节滑动头到 D 点使电流计电流为零，这时 A、D 间电压等于电动势  $\epsilon_x$ 。两次通过电池、电流计的电流都为零，通过 AB 电阻丝的电流都相同，

所以  $\frac{\epsilon_x}{\epsilon_s} = \frac{U_{AD}}{U_{AC}} = \frac{R_{AD}}{R_{AC}}$ ， $\epsilon_x = \epsilon_s \frac{R_{AD}}{R_{AC}}$ 。AB 电阻丝均匀， $R_{AD}$ 、 $R_{AC}$  与电阻

丝长度  $L_{AD}$ 、 $L_{AC}$  成正比，故最后得到  $\epsilon_x = \epsilon_s \frac{L_{AD}}{L_{AC}}$ 。

前三种测量方法由于电表电阻的影响都要造成系统误差，测量精确度不够高。第 4 种方法是一种精确的方法。如不需要精确测量电动势，我们常采用简单的方法粗测，即把电压表连结电源两端，电压表的读数就等于电动势。

伏安法测电阻根据电阻定义  $R = \frac{U}{I}$ ，用电压表测出电压  $U$ 、用电流表测出电流  $I$  就可求出  $R$ 。用伏安法测电阻的电路有两种。

(1) 外接 电流计外接的电路如图 (1) 所示， $\textcircled{V}$ 、 $\textcircled{A}$  表读数为  $U$ 、 $I$ ，

我们认为未知电阻的测量值  $R_{x\text{测}} = \frac{U}{I}$ 。实际上， $U$  却是  $R_x$  上的电压，而  $I$  是通过  $R_x$  与通过电压表 (电阻为  $R_v$ ) 的电流之和，通过  $R_x$  的电流为

$I - \frac{U}{R}$ 。所以未知电阻的真实值  $R_{x\text{真}} = \frac{U}{I - U/R_v}$ ， $R_{x\text{测}} < R_{x\text{真}}$ 。当未知电

阻  $R_x$  比电压表电阻  $R_V$  小很多时，用外接法测电阻较好。

(2)内接电流计内接的电路如图(2)所示，我们认为  $R_{x测} = \frac{U}{I}$ 。实际上，通过  $R_x$  的电流却是  $I$ ， $R_x$  上电压与  $\text{Ⓐ}$  上电压之和就是  $U$ 。 $R_x$  上的电压等于  $U - IR_A$  ( $R_A$  为  $\text{Ⓐ}$  的电阻)。未知电阻的真实值  $R_{x真} = R$   
 $\frac{U - IR_A}{I} = \frac{U}{I} - R_A$ ， $R_{x测} > R_{x真}$ 。当未知电阻  $R_x$  比电流表电阻  $R_A$  大很多时，用内接法测电阻较好。

万用表测量交直流电流、电压和电阻等多种用途的电学测量仪器。实际上是把电流表、电压表和电阻表等综合装在一起，又叫 A - V - 表。电流表的测量原理电路如图(1)所示。电压表的测量原理电路如图(2)所示。测量直流电流、电压时要注意选择好量程，测电流时要让电流从红表笔流入、黑表笔流出，测电压时红表笔接电势高的点，黑表笔接电势低的点。

电阻表的测量原理电路如图(3)所示。测量电阻时先把红黑表笔短路，调节  $R_d$  使指针满偏， $I_g = \frac{\varepsilon}{r + R_g + R_d}$ ，这叫电阻挡的调零，令  $R_{中} = r + R_g + R_d$  叫中值电阻。测量未知电阻时把红黑表笔与电阻两端连接，电流  $I = \frac{\varepsilon}{R_{中} + R_x}$ ，所以  $R_x = \frac{\varepsilon}{I} - R_{中}$ 。电阻表的刻度是不均匀的。

随着电子技术的发展，现在已越来越多地使用性能好、应用方便的数字式万用表。

**惠斯通电桥** 如图所示用比较法测量电阻的电路，又叫单臂电桥。电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  叫桥臂电阻，灵敏电流计  $\text{Ⓒ}$  好像在 c、d 两点间架设的一道桥。

电桥电路既不是串联电路，也不是并联电路或串、并联电路。电桥的应用有两种方式：(1)平衡方式；(2)不平衡方式。调节  $R_3$ 、 $R_4$  的比值使电流计  $\text{Ⓒ}$  中电流为零，这时电桥处于平衡，c、d 两点电势相等，电压  $U_{ac} = U_{ad}$ ， $U_{cb} = U_{db}$ ， $\frac{U_{ac}}{U_{cb}} = \frac{U_{ad}}{U_{db}}$ ，故  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  我们得到  $R_1 = \frac{R_3}{R_4} R_2$ 。

$R_2$  是已知阻值的标准电阻， $R_1$  是待测电阻，测出  $\frac{R_3}{R_4}$  就可求出  $R_1$ 。用平

衡电桥能精确测量电阻值。有一种简单的滑线电桥，电阻  $R_3$ 、 $R_4$  是由一根均匀的电阻丝组成，比值  $\frac{R_3}{R_4}$  通过左右两段电阻丝的长度比  $\frac{L_1}{L_2}$  就可

得知， $R_1 = \frac{L_1}{L_2} R_2$ 。

不平衡电桥是指  $\text{Ⓒ}$  中有电流通过。如果  $R_1$  是热敏电阻，由  $\text{Ⓒ}$  中的

电流可求出温度。电阻温度计就是用不平衡电桥来测量温度的。不平衡电桥还用于自动控制电路。

**电路中各点的电势** 在恒定电流电路中，我们可根据欧姆定律、电动势概念等判定电路中各点电势高低。顺着电流  $I$  的方向通过电阻  $R$ ，电势要降低  $IR$ ，逆着电流方向通过电阻电势要升高  $IR$ 。沿电动势为  $\mathcal{E}$  的电源内电路，从负极到正极电势要升高  $\mathcal{E}$ ，从正极到负极电势要降低  $\mathcal{E}$ 。

例 1. 如图(1)所示电路， $\mathcal{E}_1 = 3$  伏， $r_1 = 1$  欧， $\mathcal{E}_2 = 3$  伏， $r_2 = 2$  欧， $R_1 = 3$  欧， $R_2 = 6$  欧， $C = 200$  微法， $b$  点接地。

用闭合电路欧姆定律求得安。  $b$  点电势为零，由  $b \rightarrow c$  电势降低  $0.5 \times 6$  伏 = 3 伏，故  $U_c = -3$  伏。由  $c \rightarrow d$ ，通过  $r_2$  电势降低  $0.5 \times 2$  伏 = 1 伏，通过  $\mathcal{E}_2$  电势升高 3 伏，总起来说电势升高 2 伏，故  $U_d = -1$  伏。由  $d \rightarrow a$ ，通过  $r_1$  电势降低 0.5 伏，通过  $\mathcal{E}_1$  电势升高 3 伏，总起来说电势升高 2.5 伏，故  $U_a = 1.5$  伏。 $U_{db} = U_d - U_b = -1$  伏， $C$  上电量为 200 微库，下板带正电。

例 2. 电路如图(2)所示， $\mathcal{E} = 12$  伏， $r = 1$  欧， $R_1 = 3$  欧， $R_2 = 2$  欧， $R_3 = 5$  欧， $C_1 = 1$  微法， $C_2 = 4$  微法。求  $C_1$ 、 $C_2$  带电量。

电流方向为从电源正极经  $R_1$ 、 $R_2$  到负极， $R_3$  中无电流。选取  $U_b = 0$ ，则  $U_d = 0$ 。电流  $I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2 + r} = 2$  安，由  $d \rightarrow c$  逆电流方向经  $R_2$  电势升高 4 伏， $U_c = 4$  伏。  $c \rightarrow a$  逆电流方向经  $R_1$  电势升高 6 伏， $U_a = 10$  伏。 $U_{ab} = 10$  伏， $U_{cb} = 4$  伏。故  $C_1$  带电量为  $1 \times 10^{-5}$  库， $C_2$  带电量为  $1.6 \times 10^{-5}$  库。

**欧姆定律应用思路** 应用欧姆定律解决电路问题要注意：(1)分析电路结构，即电阻的串并联关系和电源的串并联关系；(2)分析有关的物理量，即电路各部分的电流、电压、电阻、电动势；(3)建立解题方程，即根据题意和欧姆定律等建立解题方程。如果是包含电源的闭合电路，除了需要应用闭合电路欧姆定律外，还要考虑到局部电路的变化会引起电路各部分电流、电压等的变化。

例 1. 电路如图

(1)所示， $\mathcal{E} = 3.6$  伏， $r = 2$  欧，滑线变阻器总电阻  $R = 10$  欧， $R_0 = 9$  欧。当滑动头从  $a$  端滑动到  $b$  端过程中，电流表读数如何变化。

滑动头到  $a$  端和  $b$  端的电阻设为  $R_1$ 、 $R_2$ ，则  $R_1 + R_2 = R$ 。外电路由

$R_2$  与  $R_0$  并联后再与  $R_1$  串联组成，外电路总电阻  $R_{\text{总}} = R - r_2 + \frac{R_0 R_2}{R_2 + R_0}$ 。

电路中总电流  $I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{总}} + r}$ ，通过  $R_2$  的电流  $I_2 = \frac{R_0}{R_2 + R_0} I = \frac{\mathcal{E}}{R + r + \frac{R_2(R + r - R_2)}{R_0}}$ 。

令  $y = R_2(R + r - R_2) = -R_2^2 + rR_2 + RR_2$ ， $R_2 = \frac{R + r}{2}$  时  $y$  取极大值为

$y_m = \frac{(R + r)^2}{4}$ 。滑动头在  $a$  端时  $R_2 = R$ ， $y = Rr$ 。滑动头在  $b$  端时  $R_2 = 0$ ， $y = 0$ 。

所以，滑动头在a端时， $I = \frac{\varepsilon}{R + r + \frac{Rr}{R_0}} = 0.253$ 安。滑动头由a端滑动

到 $R_2 = \frac{R+r}{2} = 6\Omega$ 时， $I_2$ 逐渐减小到极小值 $I_{2\min} = \frac{\varepsilon}{R+r+\frac{(R+r)^2}{4R_0}}$ 安。

滑动头再往下滑动到b端时， $I_2$ 逐渐增大到 $\frac{\varepsilon}{R+r} = 0.3$ 安。

例2. 测量两根输电线对地的电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 的电路如图(2)， $R$ 为负载电阻，电压表内阻 $R_V = 200k$ 。K接1时电压表示数-300V，K接2时示数为+120V。求 $R_1$ 、 $R_2$ 的阻值。

把电路整理为图(3)所示容易看出串并联关系的电路。K接1时是 $R_V$ 与 $R_1$ 并联后与 $R_2$ 串联，由分压关系知并联电阻与 $R_2$ 相等，即 $\frac{R_V R_1}{R_V + R_1}$ ，

K接2时， $R_V$ 与 $R_2$ 并联后再与 $R_1$ 串联，由分压关系得 $\frac{R_V R_2}{R_V + R_2} = \frac{1}{4} R_1$ 。联

立解得 $R_1 = 300k$ ， $R_2 = 120k$ 。

**电路定律综合应用思路** 对电路的综合问题应该在分析电路结构（电阻和电源的串并联关系）和分析有关物理量（电流、电压、电阻、电动势、电功率）的基础上，根据题意应用电路定律（闭合电路欧姆定律、部分电路欧姆定律、恒定电流条件、电功率公式、焦耳定律、电阻定律等）等建立解题方程求解。

例1. “5V5W和6V3W”的两个灯泡用12V的稳压电源供电，可利用若干个电阻使两个灯泡都正常发光且耗电最省，应该如何设计电路？

根据 $R = \frac{U^2}{P}$  求出“5V5W”和“6V3W”灯泡的电阻为5 和12 。

根据耗电量省设计出两种电路如图(1)所示，每个电路消耗的总电功率都是 $4W + 8W = 12W$ 。图中附加电阻的阻值可根据欧姆定律算出。

例2. 如图(2)所示电路，电炉电阻 $R = 19$ ，电动机电阻 $R_0 = 2$ ，电源内阻 $r = 1$ 。K断开时电炉消耗的电功率为475W，K闭合时为385W。求电动机转化为机械能的功率。

K断开时 $(\frac{\varepsilon}{19+1})^2 \times 19 = 475$

K闭合时通过电炉的电流 $I_1$ 消耗的热功率为 $I_1^2 \cdot 19 = 385$ ，端电压 $U = \sqrt{386 \times 19} = \varepsilon - I \times 1$ ， $I$ 为电路总电流。通过电动机的电流 $I_2 = I - I_1$ 。

电动机的输入功率为 $I_2 U$ ，电阻 $R_0$ 消耗的热功率为 $I_2^2 R_0$ ，所以转换为机械能的功率 $P_x = I_2 U - I_2^2 R_0$ 。

联立一式解得  $P_x=655W$ 。

**磁场** 电磁场的一个方面，是一种物质。磁场的基本特性是对运动电荷有作用，对电流、磁极也有作用力。我们根据磁场对运动电荷或电流的作用力的特点，引入磁感应强度  $B$  来描述磁场，画磁感应线形象地描述磁场。

磁场可以由运动电荷、电流和磁极（分子电流）激发，也可以由随时间变化的电场激发。

恒定电流、静止磁极产生的磁场不随时间变化叫稳恒磁场。

各点磁感应强度都相等的磁场叫匀强磁场或均匀磁场，匀强磁场的磁感应线是疏密相同的平行直线。

地球内部有电流好像一个磁体，地磁北极（N极）在南极附近（东经  $143^\circ$ 、南纬  $67^\circ$ ），地磁南极（S极）在北极附近（西经  $101^\circ$ 、北纬  $75^\circ$ ）。地磁场的磁感应强度方向与南北极方向间的夹角叫磁偏角，磁感应强度一般不是水平方向，与水平方向的夹角叫磁倾角。

天体在星际空间也产生磁场叫星际磁场，人体的一些器官也能产生磁场。

磁场的应用广泛。在电磁感应现象中，利用磁场产生电流、制造发电机。利用磁场对电流的作用力可制造电动机等。利用磁场对带电粒子运动的作用力来控制粒子运动。利用磁场的作用来分离微粒等。

**奥斯特实验** 显示电流周围空间存在磁场的实验。1812年，丹麦物理学家奥斯特根据电流通过会发热的现象，推测电流会产生磁效应。1813年，他明确预言了电流的磁效应，他把直导线放在与磁针垂直的位置，导线中通进电流后未观察到磁针的偏转，多次实验都以失败告终。1820年，奥斯特分析失败的原因，想到电流对磁针的作用可能不是沿着电流方向而是垂直于电流方向。1820年4月的一天晚上，他在讲课中把导线与磁针平行，导线中通进电流后观察到磁针的偏转，电流的磁效应就这样发现。奥斯特连续进行了3个月的实验研究，于1820年7月21日发表《关于磁体周围电冲突的实验》论文，宣告电流磁效应的确立。奥斯特在论文中说明载流导线的金属种类（白金、金、银、铜、铁、铅锡合金、水银）对效应无影响，载流导线对磁针的作用可以穿过玻璃、金属、木、水、树脂、陶器和石。

库仑断言电与磁是完全不同的，许多权威学者都赞同库仑的看法，人们一直认为电现象与磁现象是独立的，它们之间没有联系。奥斯特受康德和谢林关于自然力是统一的思想影响，他深信电力与磁力是统一的，他开始认为沿电流方向（纵向）会产生磁效应，失败后他考虑电流的磁作用可能是横向（垂直电流方向）的。至此，奥斯特经过20年的坚持不懈的努力终于发现了电流的磁效应。奥斯特实验是在明确的哲学思想指引下进行的，它不是偶然的发现。奥斯特实验说明电现象与磁现象间有紧密联系，开创了把电学与磁学联系起来的电磁学的研究时代。从奥斯特实验到法拉第电磁感应现象发现的短短11年间，电磁学的研究得到飞速发展，取得了突破性的成果。

**安培** 法国物理学家（1775~1836）。安培少年时代就表现出卓越的数学才能和惊人的记忆力，他没有进过正式学校，但他通过自学、博览群书获得丰富的知识。安培兴趣广泛、学问渊博，担任大学数学、物理

学、化学、哲学教授等，还任法兰西科学院院士。安培对数学、化学都有贡献，但他的主要成就是对电磁学的研究。1821年7月21日，奥斯特宣布发现电流的磁效应。同年9月4日，阿喇戈在法国报告了奥斯特实验。引起了安培的注意。安培紧接着进行实验研究，两周后（9月18日）安培报告他的第1篇论文，提出圆形电流产生磁性的可能性，发现电流方向与磁针转动方向间关系的安培定则。9月25日，他报告第2篇论文，说明两根平行载流导线间的相互作用情况。10月9日报告第3篇论文。安培用两三个月时间进行实验研究，总结出两电流之间的作用力规律，12月4日提出了报告。按培所做的四个实验构思新颖、结构奇巧，一直为后人称赞。他对电流间相互作用的总结具有深刻的意义。1825年，安培提出著名的分子电流假说。1827年，安培出版《电动力学现象的数学理论》，这是电磁学史上重要的经典著作。由于安培对电磁学研究的巨大贡献，被麦克斯韦称赞为“电学中的牛顿”。电流单位安（培）即为纪念他而命名的。

**安培分子电流假说** 法国物理学家安培为解释磁铁磁性提出的一种假说。安培认为构成磁体的分子内部存在一种环形电流，类似微型螺线管电流，叫分子电流或安培电流。由于分子电流的存在，每个磁分子成为小磁体，两侧相当两个磁极。通常情况下磁体分子的分子电流取向是杂乱无章的，它们产生的磁场互相抵消，对外不显磁性。如铁棒受到外界磁场作用磁化后，分子电流的取向大致相同，分子间相邻的电流相抵消，但铁棒表面上，分子电流向表面的部分未被抵消，它们的效果相当于铁棒表面有一层很强的电流流过。这个电流叫磁化电流，能产生很强的磁场，在铁棒两端形成两个磁极。

根据分子电流假说还能解释许多现象，如永磁体受到敲击或加热后，会使规则排列的分子电流变得杂乱无章，所以会使永磁体的磁性减弱或完全失去磁性。

安培提出分子电流假说时并不清楚分子的微观结构，我们现在知道分子由原子组成，原子内电子绕原子核运动和电子内部的运动都能产生磁场，这是分子电流的微观本质。电子运动产生的磁场相当于一环形电流产生的磁场。

分子电流假说已经得到证实。分子电流是分子、原子内部电子的运动形成的，这种电流不会受到阻碍作用，因此，不会产生热效应而能永远保持下去。

**磁现象的电本质** 历史最早发现的磁现象是天然磁石产生的，人们对天然磁石的磁现象进行了长期的研究。磁现象的研究与电现象的研究是独立进行的。直到1820年奥斯特发现电流的磁效应，1825年安培提出分子电流假说才把磁体产生的磁场也归结为电流的磁场。电流是电荷的运动形成的。因此，磁体的磁场和电流的磁场都是由电荷的运动产生的，这就是磁现象的电本质。

应该注意，不能认为一切磁场都是由电荷运动产生的。因为，随时间变化的电场能产生磁场。

**磁性材料** 能强烈磁化而具有强磁性的材料。任何物质都能受磁场作用而磁化，但大多数物质磁化后产生的磁场很弱。只有少数物质，如：铁、镍、钴等磁化后具有很强的磁性，这些物质叫磁性材料。

磁性材料根据化学成分分为：(1)金属磁性材料。主要是铁、镍、钴元素及其合金。这类材料磁性很强，用于低频和制造永磁体。(2)铁氧体。指以氧化铁为主要成分的磁性氧化物。磁性较上一类弱，用于高频、微波等。

磁性材料根据应用分为：(1)永磁材料。又叫硬磁材料。如：铅镍钴系合金、锰铝系合金、钕铁氧体等。这些材料磁化后能长期保留很强的磁性。(2)软磁材料。这类材料在外界磁场撤去后不能保留磁性，如“软铁、铁硅合金系、锰锌铁氧体等，是应用最广泛的磁性材料。变压器、电动机、发电机、电磁铁和电视、广播通信等领域大量应用软磁材料。(3)磁记录材料。主要包括磁头材料(软磁材料)和磁记录介质(硬磁材料)。广泛用于录音、录像、录码等。(4)压磁材料。利用磁致伸缩效应，通常用于机械能与电能的相互转换，如超声器件，滤波器等。(5)其他用于计算机、自动控制、微波器件等的磁性材料。

**磁感应强度** 描述磁场的物理量，又叫磁通密度，是矢量，符号是  $B$ ，单位是特(T)。磁场的特性是对运动电荷、电流有作用力，我们可根据这种作用来定义磁感应强度。用磁场对电流的作用力来定义磁感应强度时，我们选取一段不太长的直线电流  $I$ ，设长度为  $l$ 。把这段电流放在磁场中某点，调整电流的方向使磁场对电流的作用力最大。设磁场力

大小为  $F_m$ ，定义磁感应强度  $B$  的大小为：
$$B = \frac{F_m}{Il}$$
。并定义磁感应强度的

方向与电流方向和磁场力方向垂直，且符合左手定则的规定。这样定义的磁感应强度方向与小磁针 N 极受力方向一致、与 S 极受力方向相反。

磁感应强度是描述某点的磁场特性的物理量，某点磁感应强度大说明该点磁场强，某点  $B$  的方向就是该点磁场的方向。一般说，磁场中不同点  $B$  的大小方向不同。如果某一空间区域中各点  $B$  的大小方向都相同，这区域中的磁场叫匀强磁场或均匀磁场。均匀磁场的磁力线是疏密相同的平行直线。

恒定电流、永磁体(分子电流)产生的磁场，各点的  $B$  一般都不相等，是非匀强磁场。 $B$  的大小方向与电流的分布有关，当电流的形状、分布一定时，空间中某一点的  $B$  方向一定、大小与电流  $I$  成正比，距电流越远的点  $B$  越小。一般电磁体或永磁体所产生的磁场最强可达几特(T)，用超导体制作的线圈产生的磁场最强可达几十特，采用脉冲强电流放电短时间产生的强磁场可达几百特，用爆炸法产生的超强磁场可达几千特。地球表面的磁场很弱，约  $5 \times 10^{-5}$  特。

**磁感应线** 人为地在磁场中画出的形象描述磁场分布的一些曲线，又叫磁力线。磁感线上一点的切线方向表示该点的磁感应强度的方向。磁感线的疏密程度表示磁感应强度的大小。磁感线是帮助我们研究、了解磁场的有用的辅助工具。

磁感线的特点是：(1)磁感线不相交；(2)磁感线无起点、终点，是闭合的曲线；(3)闭合的磁感线包围电流、运动电荷或变化电场。磁感线的上述特点是磁场规律性的反映，揭示出磁场基本的普遍性质。

一些典型的磁场的磁感线如图所示，注意磁体的磁感线从磁体外部看方向从 N 极到 S 极、从磁体内部看是从 S 极到 N 极，仍然是闭合的曲线。

**安培定则** 表示电流和电流激发磁场的磁感线方向间关系的定则，也叫右手螺旋定则。

(1) 直线电流的安培定则 用右手握住导线，让伸直的大拇指所指的方向跟电流的方向一致，那么弯曲的四指所指的方向就是磁感线的环绕方向。如图(1)所示。

(2) 环形电流的安培定则让右手弯曲的四指和环形电流的方向一致，那么伸直的大拇指所指的方向就是环形电流中心轴线上磁感线的方向。如图(2)所示。

直线电流的安培定则对一小段直线电流也适用。环形电流可看成许多小段直线电流组成，对每一小段直线电流用直线电流的安培定则判定出环形电流中心轴线上磁感应强度的方向，叠加起来就得到环形电流中心轴线上磁感线的方向。直线电流的安培定则是基本的，环形电流的安培定则可由直线电流的安培定则导出。

直线电流的安培定则对电荷作直线运动产生的磁场也适用，这时电流方向与正电荷运动方向相同，与负电荷运动方向相反。例如图(3)中虚线表示一束带电粒子的射线，射线正下方的小磁针的 N 极垂直纸面向外转动，由此可知磁场方向垂直纸面向外。由安培定则可判定如为带正电的粒子，则粒子向左运动；如为带负电的粒子，则粒子向右运动。

**磁通量** 表征某一区域磁场情况的物理量。匀强磁场通过某一平面的磁通量 定义为  $\Phi = BS \cos(\theta)$ ，其中 B 是磁感应强度大小，S 是平面面积， $(\theta)$  是磁感应强度 B 与平面法线 n 间的夹角。 $(\theta) < \frac{\pi}{2}$  时 为正值， $(\theta) > \frac{\pi}{2}$  时 为负值。磁通量的单位是韦(Wb)均强磁

场通过某一曲面的磁通量，等于  $BS_n$ ， $S_n$  是曲面在与磁场方向垂直的平面上的投影面积。

在非匀强磁场中，通过某一面积 S 的磁通量等于通过许多小面积的磁通量之和  $\Phi = \sum \Phi_i$ ，而  $\Phi_i = B_i S_i \cos(\theta_i)$ ， $S_i$  是小面积， $B_i$  是  $S_i$  上的磁感应强度。

形象地说，磁通量等于通过某一面积的磁感线的条数。

磁感应强度描述某点磁场的特性，磁通量描述某一面积上磁场的特性。在揭示磁场的规律方面、在电磁感应现象中，磁通量是很有用的概念。

通过某一平面的磁通量与磁感应强度大小、平面面积和磁感应强度方向与平面法线间的夹角有关。例如，在无限长直线电流的磁场中通过图(2)中面积的磁通量等于面积 1 与面积 2 的磁通量之和，而通过面积 1、2 的磁通量绝对值相等，一正一负，磁通量为零。

计算磁通量的变化时要注意磁通量的正负。例如，当平面法线方向与匀强磁场方向相同时，通过平面的磁通量  $\Phi = BS$ ；如果平面转动  $180^\circ$  后，平面法线方向与磁场方向相反，通过平面的磁通量  $\Phi' = -BS$ 。磁通量的变化量  $\Delta \Phi = \Phi' - \Phi = -BS - BS = -2BS$ 。

**电流的磁场** 电流在周围空间激发的磁场的磁感应强度，与电流形状、大小、空间中的磁介质等因素有关。无限长直线电流在真空中产生

磁场的磁感应强度  $B = k \frac{2I}{r}$ ，其中  $I$  是电流， $r$  是该点到直线电流的距离，

$k$  是一系数，数值为  $10^{-7}$ 。无限长直线电流的磁场是非匀强磁场， $B$  与电流  $I$  成正比，与距电流的距离  $r$  成反比。

直长螺线管电流在真空中产生的磁场，在螺线管内部基本上是一匀强磁场。螺线管轴线上一点的磁感应强度  $B = \mu_0 n I$ ，其中  $I$  表示电流大小， $n$  表示螺线管单位长度的匝数，系数  $= \mu_0 4 \times 10^{-7}$ 。 $B$  也与  $I$  成正比。

一般说，电流形状、分布一定时，空间中一点的  $B$  与电流  $I$  成正比。该点离电流越远  $B$  越小，磁场中通过某一面积的磁通量也与电流成正比。

$\Phi = LI$ ，写成等式是  $\Phi = LI$ ， $L$  是电感系数。

几个电流产生的磁场  $B$ ，等于各个电流单独产生的磁场的叠加，这叫磁场叠加原理。例如，两根大小、方向相同的平行直线电流产生的磁场  $B$ ，等于每根直线电流产生的磁场的叠加。在两根直线电流的正中间虚线部分磁场  $B=0$ ，其余部分磁场  $B$  的方向如图所示。 $B$  的大小用磁感线的疏密表示。又如，4 根直线电流划分 9 个区域中，根据磁场叠加原理知区域 1、9 中的  $B$  最大，区域 3、5、7 中的  $B$  最小。

**安培力** 通电导线在磁场中受到的作用力。电流为  $I$ 、长为  $l$  的直导线，在身强磁场  $B$  中受到的安培力大小为： $F = I l B \sin(\theta)$ ，其中  $(\theta)$  为电流方向与磁场方向间的夹角。安培力的方向由左手定则判定。对于任意形状的电流受非匀强磁场的作用力，可把电流分解为许多段电流元  $l$ ，每段电流元处的磁场  $B$  可看成匀强磁场，受的安培力为  $F = I l \cdot B \sin(\theta)$ ，把这许多安培力加起来就是整个电流受的力。

应该注意，当电流方向与磁场方向相同或相反时，即  $(\theta) = 0$  或  $180^\circ$  时，电流不受磁场力作用。当电流方向与磁场方向垂直时，电流受的安培力最大为  $F = I l B$ 。

**左手定则** 确定通电导体在磁场中受力方向的定则。内容是：伸开左手，使大拇指跟其余 4 个手指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，把手放入磁场中，让磁力线垂直穿入手心。并使伸开的 4 指指向电流的方向，那么，拇指所指的方向，就是通电导线在磁场中受力的方向。

应用左手定则时，电流方向、磁场方向、安培力方向都是两两互相垂直的。但实际上，安培力方向总垂直于电流方向，也总垂直于磁场方向，而电流方向与磁场方向不一定垂直。当电流方向与磁场方向不垂直时，可分解磁场  $B$  为平行于电流的分量  $B_{\parallel}$  和垂直于电流的分量  $B_{\perp}$ ，对电流有作用力的是  $B_{\perp}$ 。对  $I$ 、 $B_{\perp}$ 、 $F$  可应用左手定则，如图(1)所示，把  $B$  分解为  $B_{\parallel}$  和  $B_{\perp}$ ， $B_{\parallel}$  对  $I$  无作用力， $B_{\perp}$  对  $I$  的作用力按左手定则判定为垂直纸面向里。又如图(2)所示，电流  $I$  沿  $x$  轴正向，受安培力沿  $z$  轴正向，则磁场  $B$  在  $xoy$  平面内可有无数的方向，由  $o$  指向第 1、4 象限。若附加  $B$  与  $I$  垂直的条件，才能用左手定则判定  $B$  沿  $y$  轴正向。

运动电荷在磁场中受洛仑兹力的方向也可用左手定则确定。但要注意此时 4 指指向正电荷运动的方向，如为负电荷则 4 指指向负电荷运动方向相反的方向。大拇指所指为洛仑兹力的方向。同样应该注意，洛仑兹力一定垂直  $B$ ，也一定垂直  $v$ ，但带电粒子速度  $v$ ，与磁场  $B$  的方向间

的夹角是任意的。当  $v$  与  $B$  不垂直时，可分解  $v$  为与  $B$  垂直的分量  $v$  和与  $B$  平行的  $v_{11}$ ，起作用的是  $v$ 。也可分解  $B$  为  $B$ 、 $B_{11}$ ，起作用的是与  $v$  垂直的分量  $B$ 。

**安培力应用思路** 载流导线在安培力作用下的平衡和运动问题，基本上是力学问题，可应用力学的概念、规律分析解决。应注意的是安培力  $F$  的方向、大小与电流  $I$ 、磁场  $B$  的方向、大小间的关系。

例 1. 如图(1)所示，细导线质量为  $m$ 、水平长  $l$ ，匀强磁场为  $B$ 。K 闭合瞬间通过导线的电流很大，导线跳起高度为  $h$ ，求通过导线的电量  $Q$ 。

在导线跳离水银槽的极短时间  $t$  内，导线受向上安培力  $F=IlB$  和向下重力  $mg$  作用。由于  $F \gg mg$ ，在  $t$  时间内可认为只受安培力作用。

应用动量定理知导线起跳速度  $v$  为： $BIl t=mv$ 。

导线跳离槽后上升过程中只受重力作用（空气阻力不计），导线克服重力做功，动能转化为势能，故  $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ 。

$$\text{联立以上两式解得 } Q=I t = \frac{m\sqrt{2gh}}{BI}。$$

例 2. 如图(2)所示，质量为  $m$ 、长为  $l$  的导线静止于倾角为  $\theta$  的光滑斜轨上，导线中电流为  $I$ ，求匀强磁场  $B$  的方向、大小。

导线受重力  $mg$ 、安培力  $F$  和斜轨支持力  $N$  作用（ $N$  大小任意）。首先判定安培力的方向在  $F_1$ 、 $F_2$  间，可为  $F_1$ ，只能接近  $F_2$ 。故磁场方向在  $B_1$ 、 $B_2$  间，可为  $B_1$ ，只能接近  $B_2$ 。

如图(3)所示，设磁场  $B$  与斜轨夹角为  $\alpha$ ，则  $F$  与斜面的夹角为  $(\frac{\pi}{2} - \alpha)$ 。  $F$  沿斜轨方向的分量  $F_1 = F \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) = IlB \sin\alpha$ 。  $F_1$  与重力的下滑分力

$mgsin \theta$  平衡。所以  $IlB \sin \alpha = mgsin \theta$ ，  $B = \frac{mgsin\theta}{Il \sin\alpha}$ 。

**电流表** 用于测量电流大小方向的机械式指示电表。磁电式电流表主要由永磁体和动圈及弹簧、指针等组成。永磁体为一蹄形永磁铁，两个磁极间有一固定的圆柱铁心，磁极和铁心的间隙中产生很强的辐向对称磁场  $B$ 。动圈由很细的漆包线在铝框上绕成，位于磁场中的动圈通进电流  $I$  受磁场力作用而转动。指针指示动圈转过的角度  $\theta$ 。

当线圈中通进电流  $I$  时，左右边受磁场力  $F=Il_1B$ ，其中  $l_1$  为左右边的长度。线圈前后边也受磁场力作用但力矩为零。若前后边长为  $l_2$ ，则左右边所受磁场力的力矩为  $Il_1l_2B$ 。线圈共  $N$  匝，磁场力矩  $M_1=NIl_1l_2B$ 。线圈在磁场力矩作用下顺时针转动，螺旋弹簧被扭动产生一个阻碍线圈转动的力矩  $M_2$ 。磁场力矩  $M_1$  是一定的，阻力矩  $M_2$  与线圈转动的角度  $\theta$  成正比， $M_2=k\theta$ ，故当线圈转动到使  $M_2=M_1$  时就稳定下来。根据  $k$

$= NIl_1l_2B$  得  $\theta = \frac{Nl_1l_2B}{k} I = CI$ ，即线圈转动的角度  $\theta$  与线圈中的电流  $I$

成正比。由指针偏转的角度可知电流  $I$  的大小。改变线圈中电流的方向，线圈、指针偏转的方向也相反。由指针偏转方向能测知  $I$  的方向。

由于永磁体材料的发展，我们可得到很强的磁感应强度，大大提高了磁电式电表的灵敏度。20 世纪 80 年代已制出几微安的电流表。但是线圈导线很细，不能通过太大电流，一般为几十微安到几毫安。如果电流超过允许值容易把线圈烧坏，应用时要注意。

**洛伦兹力** 运动电荷所受磁场的作用力。荷兰物理学家洛伦兹于 1895 年提出，洛伦兹力的大小为  $f=qvB\sin(\nu, B)$ ，其  $q$  为粒子带电量， $v$  为粒子运动速率， $B$  为磁感应强度， $(\nu, B)$  是粒子速度  $v$  与磁场  $B$  方向间的夹角。洛伦兹力方向由左手定则确定，粒子速度  $v$  与磁场  $B$  垂直时，左手 4 指指向带正电粒子速度方向或带负电粒子速度相反方向，磁场  $B$  的方向垂直穿过掌心，大拇指指向洛伦兹力方向。宏观运动电荷和微观运动电荷都受磁场作用的洛伦兹力，遵从的规律相同。

与电场力不同，洛伦兹力的特点是：(1)只对运动电荷有作用力，对静止电荷无作用力；(2)洛伦兹力的大小、方向与电荷运动速度的方向、大小有关， $v \perp B$  时无洛伦兹力， $v \parallel B$  时洛伦兹力最大；(3)洛伦兹力方向由左手定则判定， $f$  总垂直于  $v$  和  $B$ ，是一种横向力，故洛伦兹力总不做功，只改变粒子动量（速度）方向，不改变大小，不改变粒子动能。

一般说，我们把电磁场对电荷的电场力和磁场力合起来叫做洛伦兹力。

我们可利用洛伦兹力来控制带电粒子的运动，如：粒子加速器、质谱仪等。在发电机中利用洛伦兹力产生动生电动势。

**带电粒子在匀强磁场中的运动** 质量为  $m$ 、带电为  $q$  粒子以速度  $v$  进入匀强磁场  $B$  中时，由于  $v$  与  $B$  的方向间夹角不同，粒子运动情况也不同。

(1)  $v \parallel B$  时粒子不受洛伦兹力作用，粒子以速度  $v$  做匀速直线运动。

(2)  $v \perp B$  时粒子受洛伦兹力  $f$  的方向总在与  $B$  垂直的平面内。 $f \perp v$ ， $f \perp B$ ， $f$ 、 $v$  在同一个平面内，粒子在这平面内运动。 $f \perp v$ ，大小一定，故粒子做匀速圆周运动，洛伦兹力就是向心力。所以  $f = qvB = m \frac{v^2}{r}$ ，圆周轨道半

径  $r = \frac{mv}{qB}$ ，叫回转半径。粒子运动的周期叫回转周期  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 。应该特

别注意， $v$  大（小）回转半径  $r$  就大（小），但回转周期  $T$  相等。

(3)  $(v, B) = \theta$  时把  $v$  分解为与  $B$  平行和垂直的分量  $v_{\parallel} = v \cos \theta$ ， $v_{\perp} = v \sin \theta$ 。对  $v_{\parallel}$  洛伦兹力不起作用，洛伦兹力改变  $v$  的方向使粒子在与  $B$  垂直的平面内做匀速圆周运动。这时粒子沿螺旋线运动，即是垂直  $B$  方向的匀速圆周运动和平行  $B$  方向的匀速直线运动的合运动。

垂直  $B$  方向圆运动半径  $r = \frac{mv \sin \theta}{qB}$ ，周期  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 。

螺旋线的螺距  $h = v_{\parallel} \cdot T = \frac{2\pi m v \cos \theta}{qB}$ 。

例 1. 如图(1)所示，每个电子都绕着同样的正电荷做半径相同的匀

速圆周运动。(a)、(b)中  $B$  与圆垂直，三种情况下电子转动的角速度为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 。要求比较角速度大小。

(a)中电子受洛伦兹力沿半径指向圆心，(b)中电子受洛伦兹力沿半径背离圆心。向心力是电场力与洛伦兹力的合力，故(a)中电子的向心力最大，(b)中电子的向心力最小。因为向心力等于  $m \omega^2 r$ ，所以判定  $a > b > c$ 。

例2. 如图(2)所示， $x$ 轴上方有匀强磁场  $B$ ，质量为  $m$ 、带负电为  $q$  的粒子，以速度  $v_0$  从原点  $O$  垂直射入磁场， $v_0$  与  $x$  轴夹角为  $\theta$ 。求粒子在磁场中飞行时间和飞出点的坐标。

粒子作圆周运动半径  $r = \frac{mv_0}{qB}$ 。圆心为  $C$ 。  $\angle OCP = 2\theta$ ， $\widehat{OMP}$  对应的圆心角为  $(2\pi - 2\theta)$ ，故  $\widehat{OMP}$  弧长为  $r = \frac{2mv_0(\pi - \theta)}{qB}$ 。

$$\begin{aligned} & \text{飞行时间} \\ t &= \frac{2m(\pi - \theta)}{qB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{P点坐标 } x &= \overline{OP} \\ &= 2r \sin\theta = \frac{2mv_0(\sin\theta)}{qB} \end{aligned}$$

**速度选择器** 利用垂直的电场、磁场选出一定速度的带电粒子的装置。基本构造如图(1)所示，两平行金属板间加电压产生匀强电场  $E$ ，匀强磁场  $B$  与  $E$  垂直。当带电为  $q$  的粒子以速度  $v$  垂直进入匀强电场和磁场的区域时，粒子受电场力  $qE$  和洛伦兹力  $qvB$  作用，无论粒子带正电还是带负电，电场力和洛伦兹力的方向总相反。若电场力与洛伦兹力大小相等，即  $qE = qvB$ ， $u = \frac{E}{B}$ 。粒子受合力为零，匀速前进通过狭缝射出。

若粒子速度  $v' > v$ ，则洛伦兹力大于电场力，若  $v' < v$ ，则电场力大于洛伦兹力，粒子将向下或向上偏转而不能通过狭缝。所以通过速度选择器射出的粒子都是速度  $v = \frac{E}{B}$  的粒子。

例如，水平放置的两平行金属板间有匀强电场，电子从左方正中间  $a$  处以初速  $v_0$  水平射入，从  $c$  点射出时速度为  $v$ 。若保持电场不变，加一与电场和  $v_0$  都垂直的匀强磁场，使电子刚好由与  $c$  点对称的  $d$  点射出。求从  $d$  点射出电子的动能。

电子从  $c$  点射出时电场力做正功  $W$ ，电子动能增加，故  $W = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ 。

电子从  $d$  点射出时电场力做负功  $-W$ ，洛伦兹力不做功，电子动能减少。所以从  $d$  点射出电子的动能  $E_k = \frac{1}{2}mv_0^2 - W = \frac{1}{2}mv_0^2 - (\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2) = mv_0^2 - \frac{1}{2}mv^2$ 。

质谱仪 用来分析各种元素的同位素并测量其质量及含量百分比的仪器。质谱仪有多种类型，其中一种的构造原理如图所示，同位素元素的离子经加速电压  $U$  加速后射入速度选择器中。速度选择器有互相垂直的匀强电场  $E_1$  和匀强磁场  $B_1$ ，只有速度  $v = \frac{E_1}{B_1}$  的离子才能通过速度选择器而进入动量选择器。动量选择器中有匀强磁场  $B_2$ ，离子在磁场

$B_2$  中运动的圆周半径  $r = \frac{mv}{qB_2}$ ，其中  $m$  是离子质量， $q$  是电量。故  $\frac{m}{q} = \frac{B_2 r}{u}$

$= \frac{B_1 B_2 r}{E_1}$ 。已知  $q$ ，由粒子收集器上测出半径  $r$  即可求出粒子质量  $m$ 。同

位素离子的电量相同、质量不同，故半径不同，根据它们到收集器的位置和该位置上离子的多少可求出同位素元素质量及含量的百分比。

例如，一束具有各种速率的带电  $q = 1.60 \times 10^{-19}$  库的两种铜离子，质量数分别为 63 和 65。垂直射入速度选择器中， $E_1 = 1.00 \times 10^5$  伏/米， $B_1 = 0.40$  特。离子通过速度选择器后再进入匀强磁场  $B_2 = 0.50$  特的动量选择器中。离子速度  $v = \frac{E_1}{B_1} = 2.5 \times 10^5$  米/秒，故一种离子的半径  $r_1 = \frac{m_1 v}{q B_2}$

$= \frac{63 \times 1.66 \times 10^{-27} \times 2.5 \times 10^5}{1.60 \times 10^{-19} \times 0.50}$  米 = 0.33 米，另一种离子半径  $r_2 = 0.34$  米。

**回旋加速器** 使带电粒子循环加速以获得很大动能的装置。劳伦斯于 1930 年提出回旋加速器的工作原理，1932 年制造出第一台直径 27 厘米的回旋加速器。1939 年劳伦斯获得诺贝尔奖。回旋加速器的核心部分是两个 D 形的金属扁盒，两盒放在真空室中，两盒间加高频交变电场。圆柱形磁极间产生的匀强磁场垂直于 D 形盒。离子从 D 形盒中心附近的离子源发射出来后，受到两盒间高频电场加速，速度为  $v_0$ 。离子进入没有电场的 D 形盒内，在磁场作用下做匀速圆周运动。经过半个周期离子到达  $A_1$  时进入两盒间的高频电场中，又一次受到向上电场加速到速度  $v_1$ 。然后离子以速度  $v_1$  进入匀强磁场做匀速圆周运动。离子经过半个周期运动到  $A_2$  时，受到向下的电场加速到  $v_2$  以更大的半径在 D 形盒内做匀速圆周运动。如此循环加速多次，离子每通过两 D 形盒间隙一次就加速一次。

回旋加速器中的高频电场对粒子起加速作用，若粒子带电为  $q$ 、质量为  $m$ ，两盒间电压为  $U$ ，粒子初动能为零，则经过  $N$  次加速后粒子动能

$$\frac{1}{2} m v^2 = N q U。$$

回旋加速器中的匀强磁场使粒子做匀速圆周运动。粒子速度越来越大，回旋半径  $r = \frac{mv}{qB}$  也越来越大，但粒子回旋周期  $T$  不变。  $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 。

要使粒子每经过半个周期到达两盒间隙时都得到加速，要求高频电场的周期等于粒子回旋周期。粒子加速到轨道半径接近 D 形盒半径时，从盒

边缘引出。回旋加速器 D 形盒的半径越大加速粒子的能量也越大。但是，由于粒子速度增大到接近光速时质量也要增加，回旋周期要增大，这就限制了回旋加速器加速粒子的能量，对质子来说回旋加速器加速的最高能量是 20 兆电子伏，也因此回旋加速器不适合加速电子。要提高加速粒子的能量需采用新型的加速器，如同步回旋加速器、对撞机等。

**电子荷质比的测定** 电子电量与质量之比叫电子的荷质比。电子电量可用油珠实验测量，测出电子荷质比后就可求得电子质量。1897 年首先为美国物理学家霍耳对铜箔做实验时发现。

如图所示，厚为  $d$ 、高为  $h$  的一块金属导体通有向左的电流  $I$ ，磁场  $B$  垂直于电流。导体中自由电子向右运动受洛伦兹力方向向下，电子向下偏转使导体底部带负电、上部带正电，产生向下的横向电场  $E$ 。当电子受向上电场力  $eE$  与向下洛伦兹力  $evB$  平衡时，电子不再偏转，导体上下表面间有一定的电势差  $U$ 。根据  $eE=evB$  和  $U=Ed$  和  $U=vBh$ 。再由

$I = nedhv$  得  $U = \frac{IB}{neb}$ ， $U$  叫霍耳电压。  $U = R_H IB / b$ ， $R_H$  叫霍耳系数，对金

属导体  $R_H = \frac{1}{ne}$ ，上部电势高。对半导体说  $R_H = \frac{1}{nq}$ ，由于半导体单位体

积中的载流子（电子或空穴）较少，霍耳系数较大。当半导体中主要载流子是带正电的空穴时下部电势高。因此，根据电势高低能判定导电的类型：是带正电的粒子还是带负电的粒子。利用霍耳效应制造的霍耳器件用于磁强计、安培质比。电子电量可用油珠实验测量，测出电子荷质比后就可求得电子质量。1897 年英国物理学家汤姆生通过测量阴极射线的荷质比而发现了电子。

汤姆生测量电子荷质比的装置如图所示，电子从左边灯丝射出，经电场加速后通过两狭缝成一细束电子束，电子束进入 D、E 极间的向下电场  $E$  中受向上的电场力作用而向上偏转，再加一垂直纸面向里的磁场  $B$ ，使电子受向下的洛伦兹力  $evB$  与电场力平衡，电子束不发生偏转而打到荧光屏正中央。由此知电子速度  $v = \frac{E}{B}$ 。

去掉电场，只加匀强磁场  $B$ ，电子做匀速圆周运动，测出圆弧半径  $r$ 。因为  $r = \frac{mv}{eB}$ ，联立、解得电子荷质比  $\frac{e}{m} = \frac{E}{rB^2}$ 。由  $E$ 、 $B$ 、 $r$  的值，汤姆生求出  $\frac{e}{m} = 2 \times 10^{11}$  库 / 千克。

汤姆生实验是物理学发展史上最著名的经典实验之一。

**霍耳效应** 在通有电流的导体或半导体上加一与电流方向垂直的磁场，在垂直于电流和磁场的方向的物体两侧产生电势差的现象。1879 年首先为美国物理学家霍耳对铜箔做实验时发现。

如图所示，厚为  $d$ 、高为  $h$  的一块金属导体通有向左的电流  $I$ ，磁场  $B$  垂直于电流。导体中自由电子向右运动受洛伦兹力方向向下，电子向下偏转使导体底部带负电、上部带正电，产生向下的横向电场  $E$ 。当电子受向上电场力  $eE$  与向下洛伦兹力  $evB$  平衡时，电子不再偏转，导体上下表

面间有一定的电势差  $U$ 。根据  $eE=evB$  和  $U=Eb$  和  $U=vBh$ 。再由

$I = nedhv$  得  $U = \frac{IB}{neb}$ ， $U$  叫霍耳电压。  $U = R_H IB / b$ ， $R_H$  叫霍耳系数，对

金属导体  $R_H = \frac{1}{ne}$ ，上部电势高。对半导体说  $R_H = \frac{1}{nq}$ ，由于半导体单

位体积中的载流子（电子或空穴）较少，霍耳系数较大。当半导体中主要载流子是带正电的空穴时下部电势高。因此，根据电势高低能判定导电的类型：是带正电的粒子还是带负电的粒子。利用霍耳效应制造的霍耳器件用于磁强计、安培计、瓦特计、磁罗盘等。

**磁流体发电** 利用热离子气体或液态金属等导电流体与磁场的相互作用，把内能直接转换成电能的发电方式。磁流体发电通常使用矿物燃料（煤、石油、天然气）与氧气或压缩预热空气在燃烧室燃烧产生高温等离子体（即高温电离气体，含有大量带正电和带负电的微粒，从整体说呈中性），等离子体高速进入发电通道。在发电通道中与等离子体速度垂直的方向加有强磁场，带电微粒受磁场洛伦兹力作用而发生偏转打到电极上产生电压。如图所示，高温等离子体以速度  $v$  进入通道，正负带电微粒受洛伦兹力作用分别向上、向下偏转使上面电极带正电，下面电极带负电，电极间有一定电压。外电路断路时，若电场力与洛伦兹力平衡，即  $qE=qvB$ ，等离子体不再偏转，电极间电压  $U=Ed=vBd$ 。发电机的电动势  $\mathcal{E}=U=vBd$ 。

磁流体发电能提高能源的利用率，减少大气污染，节约冷却用水。前苏联的磁流体发电装置用天然气作燃料已发出 20.5 兆瓦的额定功率，美国直接燃煤的磁流体发电已发出 18 兆瓦的功率。我国也开展了研究工作，进行了试验。磁流体发电要达到工业应用阶段，还需要解决许多技术问题。

**电场力和洛伦兹力综合应用思路** 带电微粒在电场力、洛伦兹力等作用下的运动按牛顿力学规律求解。可根据运动学公式、牛顿定律、动能定理、动量定理、机械能守恒定律、动量守恒定律等分析求解。在分析求解过程中要特别注意电场力与洛伦兹力的不同特点。

例 1. 如图(1)所示，界面  $MN$  与水平面垂直，左方为匀强磁场，方向垂直纸面向里，磁感应强度为  $B$ ；右方为匀强电场，方向水平向右，电场强度为  $E$ 。两个场的区域足够大。现有一电子（质量  $m$ ，电量  $e$ ）以初速  $v_0$  在界面上  $O$  点沿水平方向垂直射入磁场区域。试画出电子运动的轨迹，并求出电子运动过程中沿竖直方向在相当长时间内的平均速率（不考虑重力作用）。

电子射入磁场区域在洛伦兹力作用下做匀速圆周运动，由  $ev_0B=mv_0^2/r$

得圆半径  $r = \frac{mv_0}{eB}$ 。电子运动半个圆周用的时间  $t_1 = \frac{\pi r}{v_0} = \frac{\pi m}{eB}$ 。

电子以速度  $v_0$  向右射入匀强电场做匀变速直线运动，经过时间  $t_2$

电子又变为以速度  $v_0$  向左射入磁场。由动量定理  $eEt_2 = 2mv_0$  得  $t_2 = \frac{2mv_0}{eE}$ 。

故电子在竖直向上方向的平均速率  $\bar{v} = \frac{2r}{t_1 + t_2} = \frac{2v_0 E}{\pi E + 2v_0 B}$ 。

例 2. 图(2)为一种获得高能粒子的装置。环形区域存在垂直纸面向外、大小可调节的均匀磁场。质量为  $m$ 、电量为  $+q$  的粒子在环中做半径为  $R$  的圆周运动。A、B 为两块中心开有小孔的极板，原来电势都为零，每当粒子离开 B 板时，A 极电势又降为零。粒子在电场一次次加速下动能不断增大而绕行半径不变，磁场也周期地增大。求使粒子绕行第  $n$  圈的  $B_n = ?$  并画出 A 极电势  $u$  与时间  $t$  的关系。

粒子绕行第  $n$  圈时经过  $n$  次加速动能  $\frac{1}{2} = mv_n^2 = nqU$ ，粒子速度  $v_n = \sqrt{\frac{2nqU}{m}}$ 。粒子绕半径为  $R$  的圆周运动所需的磁场  $B_n$  为  $qv_n B_n = m \frac{v_n^2}{R}$ ，  
 $B_n = \frac{mv_n}{qR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2nmU}{q}}$ 。

A 极电势随时间的变化如图(4)所示，是间隔越来越近的等幅脉冲。

**电磁感应现象** 通过闭合回路中磁通量的变化在回路中产生感应电动势的现象。感应电动势产生的电流叫感应电流。电磁感应现象是法拉第 1831 年发现的。

根据引起回路中磁通量变化的方式不同可把电磁感应现象分为：(1) 导线在磁场中切割磁力线运动引起回路磁通量的变化；(2) 回路不动，永磁体运动引起磁通量变化；(3) 回路不动，电路中电流通断变化引起磁通量变化；(4) 回路不动，回路自身电流变化引起磁通量变化。除这 4 种基本的电磁感应现象外，有的电磁感应现象是这几种基本现象综合形成的。

电磁感应现象是极为丰富复杂的现象。在整块导体中也能产生感应电动势和感应电流，我们可把整块导体看成由许多回路组成或许多导线组成。

回路由导体组成且闭合时，回路中的感应电动势  $\mathcal{E}_i$  产生感应电流

$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$ ， $R$  是闭合回路的总电阻。如果回路不闭合，则只有感应电动势无感应电流。

回路由绝缘体组成时，回路无论闭合与否都只能有感应电动势而无感应电流。

电磁感应现象的本质是磁通量变化产生感应电动势，感应电流可能有也可能没有，感应电流的大小除与感应电动势有关外，还与回路电阻有关。

感应电动势根据来源不同分为动生电动势和感生电动势两种基本的形式。

电磁感应现象深刻地揭示了电与磁之间的内在联系，是非常重要的电磁现象。

**动生电动势** 在稳恒磁场中，导线切割磁力线运动产生的感应电动势。一段长为  $l$  的直导线切割磁力线运动的动生电动势  $\mathcal{E}_i = Blv \sin(\nu, B)$ ，其中  $B$  为导线上的磁感应强度， $\nu$  为导线的运动速度， $(\nu, B)$  为速度

$v$  与磁感应强度  $B$  间的夹角。还应该注意，公式中的  $B$  和  $v$  都是与导线垂直的，与导线平行的  $B$  和  $v$  对动生电动势  $\varepsilon_i$  无贡献。

动生电动势是由洛伦兹力引起的。如图所示，长  $l$  的导线在磁场  $B$  中以速度  $v$  运动，导线带动其中的电子也以  $v$  运动，电子受洛伦兹力方向向下， $b$  端积累较多电子带负电， $a$  端缺少电子带正电。导线相当于电源， $a$  是正极， $b$  是负极。电子受洛伦兹力  $f = evB$ ，单位电荷受力为  $vB$ ，把单位正电荷从  $b$  移到  $a$  时洛伦兹力做的功为  $vBl$ ，故动生电动势  $\varepsilon_i = Blv$ 。导线中无电流时，电子受的电场力与洛伦兹力平衡， $E = vB$ ， $ab$  间电压  $U_{ab} = El = vBl$ 。

动生电动势的方向即导线中正电荷所受洛伦兹力的方向，可用右手定则确定。

**右手定则** 确定导体切割磁力线运动时在导体中产生的动生电动势方向的定则。右手定则的内容是：伸开右手，使大拇指跟其余 4 个手指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，把右手放入磁场中，让磁力线垂直穿入手心，大拇指指向导体运动方向，则其余 4 指指向动生电动势的方向。动生电动势的方向与产生的感应电流的方向相同。

右手定则确定的动生电动势的方向符合能量转化与守恒定律。如图(1)所示，导线向右运动，用右手定则判定导线中动生电动势方向向上，电路中产生感应电流如图。磁场对载流导线作用的安培力方向向左，要保持导线向右匀速运动外力要克服安培力做功，消耗了外界的能量，电路中得到了电能。应用右手定则时要注意对象是一段直导线，而且速度  $v$  和磁场  $B$  都要垂直于导线， $v$  与  $B$  也要垂直。右手定则不能用来判断感生电动势的方向。

例 1. 已知导线中感应电流方向和磁场方向，要判定导线运动速度方向。如图(2)所示，用右手定则判定出导线运动速度方向向上。但要注意不能肯定导线一定是向上运动的。因为，导线可以还有平行于磁场  $B$  和平行于导线的分速度。所以这类问题没有附加条件时解答是不定的。如果附加条件： $v$  与  $B$  垂直也与导线垂直，则解唯一确定，即导线向上运动。

**动生电动势应用思路** 导线切割磁力线产生动生电动势是一类很重要的电磁感应现象，发电机的电动势就是动生电动势。一段直导线动生电动势的大小是： $\varepsilon_i = Blv\sin(\theta)$ 。 $\varepsilon_i$  的方向由右手定则判定。计算  $\varepsilon_i$  大小时应该：(1)明确对象（哪一段直导线、 $l$ ）；(2)分析导线上的  $B$ （要求  $B$  相等， $B$  与导线垂直）；(3)分析导线的  $v$ （要求  $v$  相等、 $v$  与导线垂直）；(4)分析  $v$  与  $B$  的夹角。用右手定则判定  $\varepsilon_i$  方向时应注意  $v$ 、 $B$  都与导线垂直。 $v$  与  $B$  也垂直。

例 1. 如图(1)所示，一长为  $l$  的导线绕一端点为轴以角速度  $\omega$  在匀强磁场  $B$  中匀速转动，求  $\varepsilon_i = ?$

导线各点速度  $v = \omega r$ ，距转轴越远速度  $v$  越大， $v$  与  $r$  成正比，可取导线的平均速度  $\bar{v} = \frac{0 + \omega l}{2} = \frac{\omega l}{2}$ 。 $(v, B) = \frac{\pi}{2}$ 。所以， $\varepsilon_i = Bl \cdot \frac{\omega l}{2} = \frac{1}{2} Bl^2 \omega$ 。

例 2. 如图(2)所示，长为  $l$  的导体杆和竖直轴的夹角为  $\theta$ ，导体杆

匀速转动的角速度为  $\omega$ ，匀强磁场  $B$  竖直向上，求  $i$ 。

把磁场  $B$  分解为与导线平行和垂直的分量  $B_{\parallel}$ 、 $B_{\perp}$ ， $B_{\perp} = B \sin \theta$  是有效的。杆的速度各点不同， $a$  点速度  $v = \omega r = \omega l \sin \theta$ ，平均速度  $\bar{v} = \frac{\omega l \sin \theta}{2}$ 。所以， $\varepsilon_i = (B \sin \theta) \cdot l \cdot \left(\frac{\omega l \sin \theta}{2}\right) = \frac{1}{2} B \omega l^2 \sin^2 \theta$ 。

**感生电动势** 导体不动，由磁场随时间变化产生的感应电动势。感生电动势不是由洛伦兹力引起的，不能用公式  $\varepsilon_i = Blv \sin(\theta, B)$  计算

感生电动势的大小。闭合回路的感生电动势可用  $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$  计算。产生

感生电动势的非静电力是感应电场对电荷的作用力。感应电场是随时间变化的磁场产生的，又叫涡旋电场，因为感应电场的电力线是闭合的，无起点无终点。如图(1)所示，当磁场  $B$  随时间增大时，在周围空间产生的感应电场的电力线是一些闭合的曲线，方向可用楞次定律判定。

例如，电子感应加速器就是利用变化磁场产生的感应电场来加速电子的设备。柱形电磁铁在两极间产生向下的磁场，磁场中有一个环形真空管道，磁场变化在真空管道中产生感应电场，电子受感应电场力而加速运动。磁场对电子的洛伦兹力使电子沿半径为  $r$  圆形轨道运动。若磁场在  $t$  时刻为  $B$ ，经过  $\Delta t$  时间磁场变为  $B'$ ，则电子运动的圆周的磁

通量变化  $\Delta \Phi = B' S - BS = (B' - B)\pi r^2$ ，感生电动势  $\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} =$

$$\frac{\pi r^2 (B' - B)}{\Delta t}$$

变化磁场产生感应电场，感生电动势是电磁感应现象最本质的内容。

**法拉第电磁感应定律** 确定闭合回路中由于磁通量变化产生感应电动势的定律，它是法拉第于 1831 年发现电磁感应现象的基础上总结得到的。定律内容是：当闭合回路的磁通量发生变化时，闭合回路上产生的

感应电动势同磁通量的变化率成正比。用公式表示是  $\varepsilon_i = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$ ， $\frac{d\Phi}{dt}$

是  $\Delta t$  时间内磁通量的平均变化率， $\bar{\varepsilon}_i$  是  $\Delta t$  时间内闭合回路的平均感应电动势大小。

法拉第电磁感应定律不仅是电磁感应现象也是电磁学的基本定律。引起一个闭合回路的磁通量变化的方式很多，但不管是什么原因引起回路磁通量的变化，法拉第电磁感应定律都是适用的。定律中的感应电动势包括动生电动势和感生电动势，闭合导体回路在稳恒磁场中运动产生的动生电动势可用法拉第电磁感应定律计算，闭合回路不动磁场变化产生的感生电动势也可用此定律计算，回路运动、磁场也变化时产生的感应电动势亦用此定律计算。

例如，矩形线圈以角速度  $\omega$  在身强磁场  $B$  中匀速转动，线圈  $ab = cd = l_1$ ， $bc = ad = l_2$ ，共  $N$  匝。如图所示， $t_1 = 0$  时磁场的磁力线与

线圈平面平行。求t从0 ~  $\frac{T}{4}$  内的平均感应电动势。

$$\begin{aligned} t_1 = 0 \text{ 时通过线圈的磁通量 } \Phi_1 &= 0, t_2 = \frac{T}{4} \text{ 时线圈转过 } 90^\circ, \text{ 磁力线} \\ \text{与线圈垂直, 通过线圈的磁通量 } \Phi_2 &= NBS = NBI_1 l_2. \quad \Phi = \Phi_2 - \\ \Phi_1 &= NBI_1 l_2. T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad t = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2\omega}. \text{ 故线圈的平均感应电动势 } \bar{\varepsilon}_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= \frac{2N\omega B l_1 l_2}{\pi}. \end{aligned}$$

**法拉第** 1791 ~ 1867。伟大的英国物理学家和化学家。法拉第出身于贫苦的铁匠工人家庭，从小受教育很差，13岁时法拉第进了一家书店当学徒工，开始送报，后学装订书籍。业余时间法拉第自学了许多书，激起了对科学的兴趣，并动手做实验来验证书上内容。他利用一切机会刻苦学习，听讲演，参加学术活动。他听了戴维4次化学讲座，把笔记整理装订成册寄给戴维并表示献身科学的决心。22岁时经戴维介绍进皇家研究所任实验室的助手，在戴维指导下进行研究工作。法拉第从不满足现成的结论，不盲从，喜欢追根究底。法拉第具有广阔视野，丰富的想象力，深刻的批判精神和高超的实验才能。法拉第一生追求科学真理，他淡薄名利，拒绝优厚报酬，拒绝出任皇家学会主席，拒绝接受爵士称号。法拉第的高尚品德和伟大贡献已成为人类的共同财富。

法拉第在电学和化学方面都有许多发现，是19世纪的伟大实验物理学家。法拉第发现了电磁感应现象(1831)并对之进行广泛深入的研究，总结出法拉第电磁感应定律。在电学和电磁感应的研究中，法拉第提出了力线概念，后来又进一步提出“场”的概念来反对超距作用观点。“场”概念的提出是法拉第最伟大的贡献，原来只认识原子、分子等是一种物质，现在认识到场也是一种物质，这是一个很大的转折。爱因斯坦认为：“实在概念的这一变革，是物理学自牛顿以来的一次最深刻和最富有成效的变革。”1833 ~ 1834年，法拉第发现了两条电解定律。1843年，他用冰桶实验证明电荷守恒。法拉第坚信自然界的各种力是相互有关的，晚年他试图发现重力和电的关系没有成切。

**楞次定律** 确定感应电动势(感应电流)方向的定律。由俄国物理学家楞次于1834年提出。定律内容一般表述为：闭合回路中感应电流(感应电动势)的方向，总是使它产生的磁场去阻碍引起感应电流(感应电动势)的磁通量的变化。当通过回路的磁通量增大时，感应电流的磁场与原磁场方向相反；当通过回路的磁通量减小时，感应电流的磁场与原磁场方向相同。如图(1)所示。

楞次定律符合能量转化与守恒定律。如图(2)所示，当永磁体的N极向下插进闭合线圈时，通过线圈的磁通量增加，用楞次定律判定感应电流方向如图所示，线圈上端是N极，永磁体向下运动要克服线圈的斥力做功，线圈中的电能是由外界其他形式能转化来的。当永磁体的N极从线圈中抽出时，磁通量减小，感应电流对N极有引力作用，永磁体的运动要克服线圈引力做功，其他形式能转化为电能。

楞次定律是判定感应电动势(感应电流)方向的普遍定律。楞次定

律判定的对象是闭合回路，适用于一切电磁感应现象。右手定则判定的对象是一段直导线，只适用于导线切割磁力线运动的情况。右手定则可看作楞次定律的一种特殊情况。如图(3)所示，直导线  $ab$  向右切割磁力线运动，用右手定则判定导线中感应电动势的方向  $b \rightarrow a$ 。用楞次定律判定时可设想补一段回路构成闭合回路，通过闭合回路的磁通量增加，回路中感应电动势的方向是逆时针的，感应电动势存在于  $ab$  段，故方向是  $b \rightarrow a$ ，这与右手定则的判定是相同的。

当磁体与线圈由于相对运动产生感应电流时，用楞次定律判定出的感应电流方向总是起阻碍相对运动的作用。我们可把楞次定律表述为：感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。这种表述对有的问题应用起来更为方便。

**楞次定律的应用思路** 根据楞次定律内容知应用楞次定律的思路为：(1)明确对象是哪一闭合回路；(2)分析闭合回路中的磁场方向和磁通量变化情况；(3)判定感应电流（感应电动势）在回路中的磁场方向；(4)用安培定则判定感应电动势（感应电流）的方向。其中(1)是应用的对象。(2)是关键，也是困难所在。(3)是应用楞次定律，当磁通量增加时，感应电流的磁场与原磁场方向相反，当磁通量减少时，感应电流的磁场与原磁场方向相同。(4)是安培定则的应用。

例如，一闭合线圈固定在垂直于纸面的匀强磁场中。设向里为磁感应强度  $B$  的正方向，线圈中的箭头为电流  $i$  的正方向〔如图(1)所示〕。已知线圈中感应电流  $i$  随时间变化的图象如图(2)所示，试画出磁感应强度  $B$  随时间变化的图象。

原磁场的方向为正。0~0.5秒  $i$  为负，故感应电流磁场方向为负，所以原磁场是正的在均匀增强。0.5~1.5秒  $i$  为正，感应电流磁场为正，所以原磁场是正的正在均匀减弱。同理知 1.5~2.5秒原磁场是正的正在增强或是负的正在减弱。我们可画出  $B$  随时间  $t$  变化的图象如图(3)所示， $t=0$  时  $B=0$  或某一正值。

电磁感应中的电势电磁感应现象中产生了感应电动势  $\mathcal{E}_i$ ，当电路中无电流时，沿感应电动势的方向从有感应电动势电路的一端走向另一端电势逐渐升高，到达另一端时电势升高  $\mathcal{E}_i$ 。如果电路中有感应电流  $I_i$ ，则沿感应电流的方向经过电阻  $R$  电势降低  $I_i R$ 。

**例 1.** 如图(1)所示，直角三角形导线框。  $abc$  匀速穿过匀强磁场，试分析导线框进入磁场时，全部在磁场中时和穿出磁场时，线框各点电势高低。

线框进入磁场时， $bc$  边切割磁力线产生的感应电动势  $\mathcal{E}_{bc}$  方向是  $c \rightarrow b$ ， $bd$  边感应电动势  $\mathcal{E}_{bd}$  方向是  $d \rightarrow b$ 。由于  $\mathcal{E}_{bc} > \mathcal{E}_{bd}$ ，感应电流方向是  $cbdac$ 。所以  $c \rightarrow b$  电势逐渐升高，由  $b \rightarrow d$  是逆电动势和顺电流方向电势逐渐降低， $d \rightarrow a \rightarrow c$  无电动势是顺电流方向电势逐渐降低。

线框全部在磁场中时， $bc$  边和  $ab$  边产生的感应电动势大小相等，方向是  $c \rightarrow b$  和  $a \rightarrow b$ ，线框中无电流。 $c \rightarrow b$  和  $a \rightarrow b$  电势都是逐渐升高， $ac$  边无电动势，各点电势相等。

线框穿出磁场时， $ad$  边感应电动势方向是  $a \rightarrow d$ ，感应电流方向是  $adbca$ 。所以  $a \rightarrow d$  电势升高  $d \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a$  无电动势各点电势逐渐降低。

例 2 . 如图(2)所示, 滑杆 ab 长为 0.5 米, 电阻  $R_1 = 0.2$  欧, 以速度  $v = 6.0$  米 / 秒向右匀速运动。匀强磁场  $B = 0.2$  特。导轨电阻不计,  $R_2 = 0.4$  欧。若 a 点电势选定为零, 求 b、c、d 点的电势。

ab 杆切割磁力线运动产生的感应电动势  $\epsilon_i = Blv$ , 方向是 b a, 电路中感应电流  $I_i = \frac{\epsilon_i}{R_1 + R_2}$ , 方向是 adcba。  $\epsilon_i = 0.2 \times 0.5 \times 6.0$  伏 = 0.6 伏,  $I_i = 1$  安。d 点电势与 a 点相等  $U_d = 0$ 。d c 电势降低  $I_i R_2 = 1 \times 0.4$  伏 = 0.4 伏,  $U_c = -0.4$  伏, c 与 b 电势相等  $U_b = -0.4$  伏。由 b a 沿  $i$  方向电势升高 0.6 伏, 但顺电流方向要降低  $I_i R_2 = 1 \times 0.2 = 0.2$  伏, 故升高 0.4 伏。即  $U_a = 0$ 。

**电磁感应中的能量转换** 电磁感应现象产生感应电动势, 从能量观点看发生电能与其他形式能的相互转化, 遵守能量转化与守恒定律。

例 1 . 如图(1)所示, 在  $B = 0.5$  特的匀强磁场中, 相距  $h = 0.1$  米的两根水平导轨 (电阻不计) 上放一根长  $L = 0.2$  米的金属棒 ab, 每米长电阻  $r = 2.0$  欧 / 米。棒与导轨的交点为 c、d。电阻  $R = 0.3$  欧。金属棒以  $v = 4.0$  米 / 秒向左匀速运动。求使金属棒匀速运动的外力的功率和电源的功率。

金属棒向左切割磁力线运动产生的动生电动势  $\epsilon_{iab} = BLv = 0.4$  伏, 电路产生电流的电动势是  $\epsilon_{icd} = BLv = 0.2$  伏, 方向 b d c

a。cd 棒电阻  $R_{cd} = 0.1 \times 2.0$  欧 = 0.2 欧。电流  $I = \frac{\epsilon_{icd}}{R + R_{cd}} = 0.4$  安, 流过 cd 棒, cd 棒受向右安培力  $F_A = ILB = 0.02$  牛, 故外力  $F = F_A = 0.02$  牛。外力的功率  $P_{外} = Fv = 0.08$  瓦。cd 棒相当于电源, 电源的功率  $P_{电} = \epsilon_{icd} I = 0.08$  瓦。cd 棒相当于发电机, 外力的功率消耗了外界的能量, 转化为电源的电能, 所以  $P_{外}$  和  $P_{电}$  应是相等的。

例 2 . 如图(2)所示, 相距为  $L$  的两根足够长的固定金属导轨, 导轨平面的倾角  $\theta$ 。匀强磁场  $B$  垂直导轨平面。电阻  $R$  连接在导轨间。一根金属棒 ab 质量为  $m$  垂直放在导轨上, 棒与导轨间的摩擦系数为  $\mu$ 。棒从静止开始下滑, 求棒的最大速度和此时的能量转换关系。导轨和棒的电阻不计。

棒下滑过程中沿导轨方向受重力下滑分力为  $mgsin\theta$ 、滑动摩擦力  $\mu mgcos\theta$  和安培力  $I^2 R = \frac{B^2 L^2 v}{R}$  作用, 开始阶段  $mgsin\theta > \mu mgcos\theta + \frac{B^2 L^2 v}{R}$  棒加速下滑, 当速度增大到最大速度  $v_m$  时应有  $mgsin\theta = \mu mgcos\theta + \frac{B^2 L^2 v_m}{R}$

$$+ \frac{B^2 L^2 v_m}{R}$$

$$v_m = \frac{mgR(\sin\theta - \mu \cos\theta)}{B^2 L^2}$$

此时电路中电流  $I = \frac{BLv_m}{R}$ , 电阻  $R$  上发热的功率  $P_{热} = I^2 R$ , 克服摩

擦力做功的功率  $\mu mg \cos \theta \cdot v_m$  转化为棒与导轨的内能，这些能量都由棒重力势能的减少而来，单位时间内棒重力势能的减少量等于重力做功的功率  $P_{重} = mgsin \theta \cdot v_m$ 。所以应该有  $mgsin \theta \cdot v_m = I^2 R + \mu mg \cos \theta \cdot v_m$ 。

**电磁感应综合应用思路** 电磁感应现象常与其他现象一起出现。这些现象涉及到电流的磁场、安培力、欧姆定律、电功率、牛顿定律、动量定理、动能定理、热功关系等。在一个问题中这些现象或者一先一后出现，或者同时出现相互制约。至关重要是从复杂现象中分辨出基本的物理现象，根据基本概念、规律分析物理过程，建立有关关系。

例 1. 如图(1)所示，两根相距  $d = 0.4$  米的水平金属导轨置于  $B = 0.2$  特的均匀磁场中，导轨上滑杆  $ad$ 、 $cd$  受摩擦力均为  $0.2$  牛，两杆电阻均为  $0.1$  欧，导轨电阻不计。当  $ab$  杆受  $F = 0.4$  牛的恒力作用时， $ab$  杆和  $cd$  杆以  $v_1$ 、 $v_2$  作匀速直线运动，求速度差  $(v_1 - v_2) = ?$

$ab$  杆、 $cd$  杆向右匀速运动产生的感应电动势为  $Bdv_1$  和  $Bdv_2$ ，沿  $bacdb$  方向流动的电流  $I = \frac{Bdv_1 - Bdv_2}{2R}$ 。 $cd$  杆受向右安培力  $IdB$  与向左摩擦力  $f$  平衡。 $ab$  杆受向右的  $F$  与向左的安培力和摩擦力  $f$  平衡。所以  $IdB = f$ ，即  $\frac{Bd(v_1 - v_2)}{2R} \cdot dB = f$ ，故  $v_1 - v_2 = \frac{2Rf}{B^2 d^2} = \frac{2 \times 0.1 \times 0.2}{0.2^2 \times 0.4^2}$  米 / 秒  
6.25 米 / 秒。

由此可见，这是电磁感应与安培力、欧姆定律、牛顿定律的综合问题。

例 2. 如图(2)所示，一金属矩形框架右面中央有一个小孔，框架上、下面是两平行金属板。匀强磁场方向如图，框架以  $v = 2$  米 / 秒向右匀速运动时，一带电油滴以速度  $u$  向左射入框架，恰好在框架内做匀速圆周运动。求要使油滴在框架内完整地运动一周  $u$ 、 $L$  应满足的条件。

这是电磁感应与电场、洛伦兹力、牛顿定律等的综合问题。

油滴在框架内做匀速圆周运动说明，油滴带负电，电场力  $qE$  与重力  $mg$  平衡。框架左右边切割磁力线产生感应电动势  $\mathcal{E} = BLv$ ，框架上下

板间电压  $U = \mathcal{E} = BLv$ ，框架电场  $E = \frac{U}{L} = Bv$ 。故  $mg = qE = qBv$ ， $B \frac{mg}{qu}$ 。

油滴在洛伦兹力作用下做匀速圆周运动，由牛顿定律得  $quB = m \frac{u^2}{R}$ ，圆周半径  $R = \frac{mu}{qB} = \frac{uv}{g}$ 。周期  $T = \frac{2\pi R}{v} = 2 \frac{u}{g}$ 。

要让油滴在框架完整地运动一周不碰到上板应有  $\frac{L}{2} > 2R$ ，所以  $L$  满足条件是  $L > 4R \frac{4uv}{g} = 7.25$  米。要让油滴不碰到右板， $u$  应满足的条件是

$v \cdot \frac{3}{4} T > R = \frac{uv}{g}$ ，所以  $v > \frac{3}{4} g T \frac{3\pi v}{2} = 3\pi$  米 / 秒。

**自感** 导体回路中电流变化引起通过回路的磁通量变化在回路自身中产生感应电动势的现象。自感现象是电磁感应现象的一种，所产生的

电动势叫自感电动势，是一种感生电动势。

当导体回路或线圈中电流增大时，所产生的自感电动势方向与电流方向相反，对电流的增加起阻碍作用。当导体回路或线圈中电流减小时，自感电动势的方向与电流方向相同，对电流的减小起阻碍作用。总之，自感电动势的作用是阻碍回路或线圈中电流的变化。从现象上看回路或线圈中电流表现出有“惯性”，即电流不能飞跃变化，电流的变化是连续的，电流的增大或减小过程都需要一定的时间。例如，电动势、内阻为  $\mathcal{E}$ 、 $r$  的电源与电阻为  $R$  的线圈组成一个电路，闭合电键后电路中的稳定电流  $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ 。电路中的电流从零增大到稳定值  $\frac{\mathcal{E}}{R+r}$  需要经过一段时间，而不是闭合电键后立即达到稳定性。

通过导体回路或线圈的磁通量  $\Phi$  与回路或线圈中的电流  $I$  成正比， $\Phi = LI$ ，其中  $L$  叫自感系数，单位为亨(H)。线圈的自感系数与线圈形状、截面积、长短、匝数、有无铁心等因素有关。自感系数数值上等于  $I = 1$  安时通过线圈的磁通量。

根据法拉第电磁感应定律，自感电动势  $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = L \frac{dI}{dt}$ ，即自感

系数越大、电流变化率越大自感电动势也越大。自感系数  $L = \mathcal{E}_i / \frac{dI}{dt}$ ，

即自感系数数值上等于电流变化率为 1 安 / 秒时电路中的自感电动势。自感系数越大，回路或线圈中的电流越不容易变化。

**断路自感** 载有电流的线圈或回路突然断开电路时产生的自感现象。如图(1)所示电路， $L$  是一带铁心的线圈，电阻为  $R_L$ ， $A$  是灯泡，电阻为  $R$ ， $R_L < R$ 。电键  $K$  闭合时通过  $L$  与  $A$  的电流  $I_L > I_A$ 。若  $K$  断开， $A$  中电流  $I_A$  很快减少为零， $L$  中电流  $I_L$  由于线圈自感系数大要经过一段时间才减少为零，电流  $I_L$  由线圈左端流出经  $a$   $A$   $b$  再回到线圈右端，变化情况如图(2)。因为  $I_L > I_A$ ，所以  $K$  断开时观察到灯泡突然更亮一下才熄灭，应该注意  $K$  闭合时流过灯  $A$  的电流方向  $b$   $a$ ， $b$  点电势高； $K$  断开时流过灯  $A$  的电流方向  $a$   $b$ ， $a$  点电势高，特别是流过灯  $A$  的电流从  $I_A$  很快变为  $I_L$  再逐渐减少。

另一类断路自感现象是，电键断开时，电路电阻突然增到很大，电流很快减小，产生很大的自感电动势，在开关两端有很高电压，开关间电场很强，空气发生击穿，观察到开关处打火的现象。如果电路中电流很大，突然断开电路会引起危险，我们应采取有效措施解决，如用铁壳开关、油浸开关、逐渐减小电流等。

**自感现象的应用** 线圈的自感在无线电技术广泛用来产生电磁振荡、扼制高频电流等，在各种用电设备中也有许多应用。

日光灯电路如图(1)所示，日光灯管是充有稀薄水银蒸汽的管子，内壁涂有荧光粉，水银蒸汽放电时发出紫外线照射荧光粉产生白光。点燃日光灯管需要比 220 伏高的电压，灯管点燃后只需要小于 220 伏的电压。镇流器是一个有铁心的线圈，起动器是充有氖气的小玻璃泡，用双金属片和一不动的片做两个电极。开关  $K$  闭合时，电流通路为镇流器—灯管

灯丝—起动器—灯管灯丝—电源，灯丝受热发射电子。氖管中双金属片受热伸长与不动片接触然后断开，电路中电流很快减小，镇流器线圈中产生很大的自感电动势，在灯管两端出现高压点燃灯管。电流通路变为镇流器—灯管—电源，镇流器起限压降流作用，使加在灯管电压小于 220 伏。

有时需要减小线圈的自感作用，可采用双线绕法如图(2)，由于电流方向相反，通过线圈的磁通量几乎为零，电流变化时线圈中的自感电动势很小，可以忽略自感现象。

**涡流** 又称为涡电流或傅科电流。由于电磁感应作用在导体内部产生的感应电流。导体在磁场中运动或处于迅速变化的磁场中时，导体内部出现像水中旋涡的感应电流，所以叫涡流。由于金属导体电阻率小，涡电流很大。磁场变化越快时感应电动势越大，涡电流也很大。强大的涡电流在导体中产生大量热，导体内能增加。这能量来自机械能、外界的机械功（导体在磁场中运动时）或使磁场变化的能源。

可利用涡电流产生的焦耳热制成感应加热设备。如工业上用的高频感应电炉就是在线圈内通入高频交流电流产生迅速变化的磁场，冶炼炉内的金属产生很强的涡电流使金属熔化。这种冶炼方法速度快、质量好。

导体在磁场中运动产生的涡电流受磁场的作用力要阻碍导体的运动，这叫电磁阻尼。电磁阻尼在实际中应用很广。如电能表中的铝盘用电时转动，不用电时磁铁的磁场使铝盘很快停下。磁电式电流表中的线圈常绕制在铝框上，线圈转动时受电磁阻尼作用很快停下。电磁阻尼作用还常用于电气机车的电磁制动器中。

金属导体中涡电流产生的大量焦耳热对变压器、发电机、电动机等电气设备极为不利，它会降低设备效率甚至烧毁设备。为降低涡流，电机和变压器常用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠制成的铁心。硅钢电阻率比普通钢大，用片状把涡电流限制在每片内，涡电流将大为减小。

**交流电的产生** 矩形线圈在匀强磁场中匀速转动能产生交流电。如图(1)所示，线圈 abcd 的边长  $ab=cd=l_1$ ， $bc=da=l_2$ ，以角速度  $\omega$  在匀强磁场 B 中匀速转动，设线圈从中性面（与磁场垂直的平面）开始转动，经过时间 t 转过角度  $\theta = \omega t$ 。如图(2)所示，ab 边切割磁力线产生的感应电动势  $\epsilon_{i_{ab}} = Bl_1 v \sin \theta = Bl_2 \omega \frac{l_1}{2} \sin \omega t$ ，方向如图。cd 边的感应电动势

$\epsilon_{i_{cd}} = Bl_1 \omega \frac{l_2}{2} \sin \omega t$ ，方向如图。一匝线圈的感应电动势  $\epsilon_i = Bl_1 l_2 \omega \sin \omega t$ ，S 是线圈面积。如线圈有 N 匝，则整个线圈的感应电动势  $\epsilon_{i_{总}} = NBS \omega \sin \omega t$ 。我们规定沿 a b c d 的方向为电动势的正方向，线圈中电动势大小、方向随时间变化，可用式子表述为  $e = \epsilon_m \sin \omega t$ ，e 是电动势的瞬时值， $\epsilon_m = NBS \omega$  是电动势的最大值， $\epsilon_m$  是按正弦规律变化的。

如果线圈电阻为 r，外电阻为 R，则电路中电流的瞬时值  $i = \frac{\epsilon}{R + r} =$

$\frac{\epsilon_m}{R + r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$ ， $I_m$  是电流的最大值。线圈的电压的瞬时值  $u = iR$

$=I_m R \sin t = U_m \sin t$ ,  $U_m$  是电压的最大值。

**交流电** 简称交流。大小和方向都随时间变化的电流。电流的大小、方向随时间变化的情况有许多种,常见的有:正弦波、锯齿波、方波、调幅波等。通常说的交流电流指周期性电流,其中最基本的是正弦交流电流,电流瞬时值  $i = I_m \sin t$ 。正弦交流电是实践应用上和理论上最重要的交流电,这是因为:(1)许多用电器(如电动机等)要用正弦交流电,其它形式的交流电对用电器可能引起不良效果(产生高电压、干扰等);(2)其它非正弦或非周期性的交流电可分解成许多不同频率的正弦交流电的叠加。近代电力系统提供的交流电几乎都是正弦交流电。

**交流电的有效值** 又叫方均根值。交流电  $i$  和直流电  $I$  通过同样阻值的电阻,在一个周期的相同时间内,如果它们产生的热量相等,直流电  $I$  等于交流电  $i$  的有效值。电动势、电压、电流的有效值通常用  $U$ 、 $I$  表示,最大值用  $U_m$ 、 $I_m$  表示。正弦交流电的有效值与最大

值的 关系为  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$ ,  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m$ ,  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \varepsilon_m$ 。

交流电的瞬时值随时间变化,不同时刻交流电产生的效果一般不同。交流电的有效值可用来说明在一个周期时间内产生的平均效果。有效值为  $I$  的电流通过电阻  $R$  产生焦耳热的平均功率  $P_{\text{热}} = I^2 R$ 。如加在电阻两端交流电压有效值为  $U$ ,电阻消耗的平均电功率  $P = IU$ 。

交流电的有效值应用很广,通常说的交流电流、电压、电动势指的是有效值。如照明电路电压为220伏是有效值,最大值是  $220\sqrt{2}$  伏 311 伏。使用交流电的电器上所标的额定电压、额定电流指的是有效值。各种测量交流电的电表指示的也是有效值。

**交流电的周期和频率** 表示交流电变化快慢的物理量。交流电完成一次周期性变化所需的时间叫周期  $T$ ,单位是秒,交流电在 1 秒内完成周期性变化的次数叫频率  $f$ ,单位是赫(Hz)。周期和频率的关系是

$T = \frac{1}{f}$  或  $f = \frac{1}{T}$ 。 $T$  越大说明交流电变化越慢, $f$  越大说明交流电变化越

快。我国的交流电  $f = 50$  赫, $T = 0.02$  秒,1 秒内方向变化 100 次。有的国家的交流电规定  $f = 60$  赫。

交流电流  $i = I_m \sin t$  中的  $\omega$  叫角频率,与  $f$ 、 $T$  的关系是  $\omega = 2\pi f$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ 。也可说明交流电变化的快慢。

**交流电的表示** 交流电流、电压、电动势随时间变化的情况可用公式、图象和交流电三要素表示。交流电流  $i = I_m \sin(\omega t + a)$  这是用公式表示交流电流  $i$  随时间  $t$  的变化情况,交流电压  $u$ 、电动势  $\varepsilon$  也可用类似公式表示为  $u = U_m \sin(\omega t + a)$  和  $\varepsilon = \varepsilon_m \sin(\omega t + a)$ 。交流电的图象  $i \sim t$ 、 $u \sim t$ 、 $\varepsilon \sim t$  是用一曲线表示交流电随时间变化的情况如图所示。

交流电还可以用交流电三要素即:最大值(或有效值)、频率(或角频率、周期)和初相位表示。如电流的最大值  $I_m$ (或  $I$ )、频率  $f$ (或  $\omega$ 、 $T$ )和初相位  $a$  知道了,可写出电流瞬时值  $i$  的公式表示是  $i = I_m \sin(2\pi f t + a)$ ,可画出  $i \sim t$  图象。

一个交流电可以用公式、图象、交流电三要素之一来表示，知道其中一种表示就能转换为其他两种表示。已知公式  $u=U_m \sin(\omega t + a)$ ，可画出  $u \sim t$  图象，从公式知最大值为  $U_m$ 、频率  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ，初相位为  $a$ 。

已知  $u \sim t$  图象，则从图象上直接读出最大值  $U_m$  和周期  $T$ ，而  $f = \frac{1}{T}$ 。

初相位 根据  $t = 0$  的值  $u_0 = U_m \sin a$  求出为  $a = \arcsin \frac{u_0}{U_m}$ 。由最大值、

频率、初相位可写出公式表示。

**三相交流电** 三个最大值相同、频率相同、相位彼此相差  $120^\circ$  的单相交流电。如图(1)所示三相交流发电机的铁心上固定三个相同的线圈 AX、BY、CZ，线圈平面互成  $120^\circ$ 。铁心匀速转动后三个线圈产生最大值相同、频率相同、相位相差  $120^\circ$  的三个单相交流电动势为： $e_A = E_m \sin \omega t$ ， $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ ， $e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$  可用  $e \sim t$  图象表示如图(2)所示。

三相发电机和三相负载都有两种连接方法：星形连接和三角形连接。星形连接是把三个线圈始端 A、B、C 引出导线叫相线（照明电路中叫火线），三个线圈末端 X、Y、Z 连接在一起引出一根导线叫中性线（照明电路中叫零线）。每个线圈两端的电压叫相电压，两条相线之间的电压叫线电压， $U_{线} = \sqrt{3}U_{相}$ 。我国照明电路里的  $U_{相} = 220$  伏， $U_{线} = 380$  伏。三角形接法是把三个线圈的始端和末端依次相连，如图(3)所示。在三角形接法中  $U_{相} = U_{线}$ 。

**变压器** 根据电磁感应规律变换交流电压、电流等的设备。变压器一般由铁心和两组或多组线圈组成，如图(1)所示，联接到交流电源上的线圈叫原线圈（或初级线圈、一次绕组），联接到负载上的叫副线圈（或次级线圈、二次绕组）。

原线圈上加交流电压  $U_1$ ，铁心中产生交变的磁通量，在副线圈中产生感应电动势、两端具有电压  $U_2$ 、 $U_3$ 。输入原线圈的电功率，通过铁心中的磁场能转换为副线圈的电功率输出。对没有能量损耗的理想变压器，原副线圈的电压与匝数成正比，即  $\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} = \frac{U_3}{N_3}$  或  $U_1 : U_2 : U_3 = N_1 : N_2 : N_3$ 。原线圈的输入功率  $I_1 U_1$  等于副线圈的输出功率  $I_2 U_2 + I_3 U_3$ 。原副线圈中电流的关系为  $I_1 N_1 = I_2 N_2 + I_3 N_3$ 。

例如，在图(2)中，理想变压器原副线圈匝数比  $N_1 : N_2 = 1 : 2$ ， $U = 220$  伏。保险丝 A 的额定电流  $I_0 = 1$  安。要使原线圈中电流不超过  $I_0$ ，调节电阻 R 时，其阻值不能小于多少欧？

$$\text{由 } \frac{U_2}{N_2} = \frac{U}{N_1} \text{ 得 } U_2 = \frac{N_2}{N_1} U = 440 \text{ 伏。}$$

$$\text{由 } I_0 N_1 = I_2 N_2 \text{ 得 } I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_0 = 0.5 \text{ 安。}$$

$$R = \frac{U_2}{I_2} = 880 \text{ 欧。即 } R \text{ 的阻值不能小于 } 880 \text{ 欧。}$$

变压器用途很多，变压器用来升高电压以减少输电损失，变压器用来降低电压以保证人身安全，变压器用来变换电流以测量强电流，变压器还用来变换阻抗和起隔离作用等。

变压器的种类很多，有单相变压器、三相变压器、调压变压器（自耦变压器的一种）、电压互感器、电流互感器等。

**远距离输电** 发电厂和用电中心通常不在一个地区，通过输电可把发电厂的电能输送到远距离的用电中心。与其他形式能源的输送比较，电能的输送具有损耗小、效益高、污染少的优点。

输电线路的损耗主要是由于电流通过输电线路发热造成的，由焦耳定律  $Q=I^2Rt$  知，减小损耗的有效办法是减小电流  $I$  和电阻  $R$ 。实践上减小电阻有一定限制（输电线不能太粗），最重要的是减小电流。在输送电功率  $P$  一定时，根据  $P=UI$  知，升高电压可减小电流。所以现代远距离的大功率的输电都采用很高的电压。高压输电架空线的电压、容量和输送距离的关系如表所示。

输送电压 (千伏)	输送容量 (兆瓦)	输送距离 (千米)
110	10 ~ 50	50 ~ 150
220	100 ~ 500	100 ~ 300
300	200 ~ 800	200 ~ 600
500	1000 ~ 1500	150 ~ 850
765	2000 ~ 2500	500 以上

通常将 220 千伏及以下的输电电压叫高压输电，330 ~ 765 千伏的输电电压叫超高压输电，1000 千伏及以上的输电电压叫特高压输电。提高输电电压有很多好处，至 1987 年，世界上高压输电电压已达到 765 千伏。1150 千伏的特高压输电已有工业性试验。我国于 1972 年首先应用 330 千伏输电，1981 年首次建成 500 千伏输电线路，现已逐步形成以 500 千伏输电为骨干的超高压电力系统。

由于发电机的输出电压不够高，用户需要的电压又较低，所以输电时先用升压变压器升高电压再输电，到用电地区后经过降压变压器逐步降低到 220/380 伏，送给一般电户。

例如，一小发电站输出电压 250 伏，输出功率 50 千瓦。输电线电阻为 80 欧，输电线损耗的电功率为输出功率的 4%。用户需要 220 伏电压，求升压变压器和降压变压器的匝数比。

输电电路如图，输出功率  $P_1 = U_1 I_1$ ，故  $I_1 = \frac{P_1}{U_1} = 200$  安，由  $I_2^2 R_0 =$

$P_1 \times 4\%$  得  $I_2 = 5$  安。根据  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{40}$  求得升压变压器的匝数比。

降压变压器的输入、输出功率  $P_2 = (1 - 4\%) P_1$ ，而  $U_3 = \frac{P_2}{I_2} = 9600$

伏，所以  $\frac{N_3}{N_4} = \frac{U_3}{U_4} = \frac{480}{11}$ 。

除了交流高压输电外，现代又发展直流高压输电，对大功率远距离的输电用直流超高压输电有许多优点，我国第一条±500千伏的直流输电线路于1989年运行。今后将是交、直流输电系统。

高温超导体发现后，超导输电是新的输电前景。

**电磁振荡** 电路中的电荷和电流以及跟它们相联系的电场和磁场作周期性变化的现象。在电磁振荡过程中产生的大小、方向周期性变化的电流叫振荡电流。产生振荡电流的电路称为振荡电路。

LC振荡电路中电容器的电能与电感线圈的磁能相互转换。当电容器充完电通过线圈放电时，由于线圈自感作用放电电流由0逐渐增大，放完电后电流达到最大。然后电流逐渐减小使电容反向充电，电流减小到0时电容充电完毕。电容又反向放电、充电，电路中的电流反方向逐渐增大又逐渐减小。电容器上的电荷和电路中的电流完成了一个周期的变化。应该注意，当电容上电荷q、电压u最大时电路中电流i=0，当q、u为0时电路中电流i最大。

LC振荡电路由于存在电阻要消耗电能（转化为焦耳热），电路还要辐射电磁波，振荡电流i将逐渐衰减，是一种阻尼振荡。要产生持续不断的振幅不衰减的等幅振荡必需向电路补充能量。

**电磁振荡的周期和频率** 电磁振荡完成一次周期性变化需要的时间叫周期T，1秒内完成周期性变化的次数叫频率f。LC振荡电路在不受外界影响、电路无能量损耗时的固有周期 $T=2\sqrt{LC}$ ，固有频率 $f$

$=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，其中L是线圈的自感系数，C是电容器电容。T、f、L、C的单位分别是秒、赫、亨、法。C越大T也越大是因为，在充电电压一定时，C越大电量Q越大，放完电需要的时间就长。L越大T也越大是因为，在电量一定时，L越大由自感作用使放电电流越小，放完电需要的时间就长。

实践中需要改变振荡电路的固有周期或固有频率，如改变较大可变化线圈的电感，如改变不太大可用可变电容。

**电磁场** 相互联系的变化电场和变化磁场。麦克斯韦的电磁理论认为，统一的电磁场中电场与磁场的联系表现是：变化磁场在其周围空间产生电场，如果磁场的变化是不均匀的，则产生的电场也是变化的；变化电场在其周围空间产生磁场，如果电场的变化是不均匀的，则产生的磁场也是变化的。电磁感应现象中随时间变化的磁场产生感生电场，感生电动势是变化磁场产生电场的实验证明，变化电场产生磁场也已得到实验证明。电场与磁场的联系是电磁场理论的核心。

电磁场中的电场方面可由电荷产生，也可由变化磁场产生，电荷产生的电场电力线不是闭合的，始于正电荷终于负电荷，变化磁场产生的电场电力线是闭合的。磁场方面可由电流、运动电荷产生，也可由变化电场产生，这两种磁场的磁力线都是闭合的。

电磁场由光子组成，光子以光速度运动。电荷间的相互作用是通过电磁场来实现的。

**电磁波** 变化电磁场在空间中的传播。空间中某处电场交变变化就在周围空间产生交变磁场，交变磁场又在周围空间产生交变电场，电场和磁场就这样交替变化逐渐由变化的区域传播出去形成电磁波。麦克斯

韦电磁场理论的这个预言已为赫兹实验证实。

不同频率的电磁波在真空中传播的速度相同，都等于  $c=3.00 \times 10^8$  米/秒。电磁波的传播速度与发射电磁波的物体运动速度无关。在媒质中电磁波的传播速度  $v$  小于  $c$ ，若媒质折射率为  $n$ ，则  $v = \frac{c}{n}$ 。在同一种媒质中，不同频率的电磁波传播速度不同，一些情况下频率越高传播速度越小。

电磁波的传播速度  $v$  与频率  $f$ 、波长  $\lambda$  的关系是  $v = f\lambda$ 。电磁波由一种媒质进入另一种媒质时频率不变，传播速度和波长会变。

$$\text{LC振荡电路发射的电磁波的波长} \quad \lambda = \frac{v}{f} = v \cdot 2\pi \sqrt{LC}.$$

**电磁波的发射** 根据电磁场理论只要空间中某处有振荡的电场或磁场就会由此处向外发射电磁波，但要更有效地向外发射电磁波，对振荡电路的要求是：(1)振荡频率足够高，振荡电路辐射电磁波的能量与频率的4次方成正比；(2)振荡电路的电场和磁场尽可能分散到尽可能大的空间，采用开放电路；(3)振荡电路的天线的长度与发射电磁波的波长相差不多。

发射电磁波是为了传递信号，信号的频率低，电磁波的频率高，使电磁波随信号改变叫调制。使高频振荡的振幅随信号改变叫调幅。使高频振荡的频率随信号改变叫调频。一般无线电广播是调幅。立体声广播是调频，电视图像信号的传递是调幅，声音信号的传递是调频。

电磁波的接收天线接收到各调幅广播电台发射的调幅波，产生感应电流。为了选出所要听的电台要经过调谐，即调节 LC 振荡电路的电容  $C$  或电感  $L$ ，使振荡电路的固有频率与所要接收电台的频率相等，振荡电路产生电谐振，接收电台的电流最强，其他电台的电流很弱。调谐电路选出的电台的电流是调幅高频振荡电流，为了从其中取出声音信号需要进行检波。利用二极管的单向导电性把调幅高频振荡电流变成单向脉动电流，其中的高频成分通过电容器，声音信号电流则通过耳机还原成声音。调谐电路和检波电路如图所示。

**晶体二极管** 用半导体材料（晶体）制成有一个 PN 结、正负极两根电极引线的电子元件。晶体二极管的符号如图(1)所示。

晶体二极管的导电特性是单向导电性。(1)当二极管正极电势高于负极时，二极管导通，有电流流过二极管，二极管表现出对电流的阻碍作用很小。当二极管负极电势高于正极（反向电压）时，二极管截止，只有极小的电流流过二极管，表现出对电流的阻碍作用很大。二极管的单向导电性可用图(2)中的图线说明，横轴表示加在二极管上的电压，纵轴表示通过二极管的电流。对理想二极管可认为：导通时二极管电阻为零，截止时二极管电阻无穷大。实际二极管要考虑导通时通过二极管的电流有一个允许值，超过了会烧坏二极管；截止时加在二极管上的反向电压要受到限制，超过了二极管会被击穿而毁坏。

二极管的好坏可用欧姆表示判定，好的二极管正极接黑表笔、负极接红表笔时电阻应很小，负极接黑表笔、正极接红表笔时电阻应很大，否则就不是好二极管。

二极管的单向导电性可用来整流（把交流电变成直流电）、检波、

稳压等。

**晶体三极管** 用半导体材料制成的有两个 PN 结、3 个电极引出线的电子元件。3 个电极引出线中一个叫发射极 e，一个叫集电极 c，一个叫基极 b。晶体三极管有两种类型：PNP 型和 NPN，符号如图(1)所示，发射极箭头方向表示电流方向。

PNP 型三极管应用时，e 极电势高于 b 极，c 极电势低于 b 极。如图(2)所示，电流分配关系为： $I_e = I_c + I_b$  和  $I_c = \beta I_b$ 。其中  $I_c \gg I_b$ ，叫电流放大系数，不同三极管  $\beta$  值不同，也可近似认为  $I_c \approx \beta I_b$ 。由电流分配关系和基极电流很小的变化  $I_b$  能引起集电极电流很大的变化， $I_c$  是  $I_b$  的几十倍、上百倍。

三极管是非常重要的电子元件，可用来把微弱电流放大、产生电磁振荡等。

## 四、光学与近代物理

可见光 能引起人视觉的电磁波。广义范围内的光指全部电磁波(如图)。迄今为止,所知的最长波长为  $10^7$  米左右,最短波长为  $10^{-15}$  米左右。其中能引起人视觉的可见光波长约在  $7.7 \times 10^{-7} \sim 3.9 \times 10^{-7}$  米,它包括从红光到紫光的各种单色光,其波长范围大致如下表( $\times 10^{-7}$ 米):

7.7	6.3	6.0	5.7	5.0	4.5	4.3	3.9
红	橙	黄	绿	青	蓝	紫	

在全部电磁波中,除可见光外,还有无线电波、微波、红外线、紫外线、X射线、 $\gamma$ 射线,它们只能借助光学仪器或摄影才能观察到,不能直接引起人的视觉,叫不可见光。

光具有粒子性,组成光的微粒叫光子。光子是一种能量元,其能量等于光波的频率与普朗克常数  $h$  的乘积  $h\nu$ 。光与近代物理学的发展和成就密切相关,尤其是 20 世纪 60 年代激光的产生和应用为光学的研究和发展开辟了新的领域。

不可见光见“可见光”。

**天然光源** 自然发光(电磁波)的物体。主要指太阳和一切发光的星体。在茫茫宇宙中,有无数星体在常年累月地自然发光,其中对地球影响最大的是太阳。太阳发出的光是地球上光和热的主要源泉。科学家们测定,每分钟内垂直于太阳光的平面上,每平方厘米受到的太阳光能(辐射能)是 1.97 卡,我国陆地表面每年接受到的太阳光能约为  $1.2 \times 10^{19}$  千卡。

以太阳光为主的天然光源有许许多多的优越性。但它比较分散,又限于白天,并易受气候条件的影响,数量也不够稳定。人类在发展进程中,为弥补这些不足,从发明用火开始,逐渐发现和开发了许多其它光源,同时对太阳光源的利用也更为充分和广泛。

**人造光源** 人工制造的光源。人类最早依赖的是天然光源,由于生存和发展的需要,发明了用火,从而使人类文明向前迈进了一大步。19 世纪以前人们使用的人造光源主要是燃烧的物体如火把、油灯、蜡烛、煤气灯等。进入 19 世纪发明了电灯;20 世纪初,制成了气体放电灯;20 世纪 50 年代以后,场致发光灯、放射性同位素灯相继出现;1960 年又出现激光器。除古老的燃烧物外,常见的人造光源主要分为:热辐射光源。利用热能激发的光源。任何物体都有热辐射现象,给物体加热,使之温度达到 1500 左右,就可辐射白炽光。温度越高,辐射的总能量越大,且短波长光的能量占的比便越大。热辐射光源发射连续光谱。常见的有弧光灯、白炽灯、碘钨灯等。主要用于室内、室外照明。气体放电光源。利用气体放电发光的光源。气体放电时,被加速的电子及离子同气体原子、离子、分子碰撞,使后者受到激励而发光,以及电子同正离子复合而发光。其发光光谱有线状光谱,带状光谱,也有连续光谱。发光的性质与气体种类、气压高低、电流密度的大小及光源的具体构造等因素有关。控制这些因素可制成多种气体放电灯,主要有低压汞灯、高压汞灯、氙灯、钠灯等。可用于室内、外照明,各种摄影的光源及显微镜等光源。激光光源。能够发射激光的装置。具有高定向性、高单

色性、高相干性、高亮度等特点。常用的有固体激光器、气体激光器、液体激光器等。在工业、农业、生物学、医学及通讯等方面有极广泛的应用。此外还有电致发光屏、光电二极管等也属人造光源。

**光能量** 光源在单位时间内，向周围空间辐射并引起视觉的能量。用符号  $\Phi$  表示。在国际单位制中，光能量的单位是流明，简称流，记作  $lm$ ，规定一个面积为  $5.305 \times 10^{-3}$  毫米<sup>2</sup>的绝对黑体在铂的凝固温度 2040K 时所辐射的光能量为 1 流明。发光体每瓦功率完全化为波长等于 555 微米的光波时，其光能量为 683 流明。

当 1 流明的光通量照射到 1 米<sup>2</sup>的被照面时，被照面上接受的光能量为 1 勒克斯。勒克斯叫照度的单位。

**发光强度** 点光源在单位立体角内发出的光通量。用符号  $I$  表示。它是点光源在一定方向范围内发出可见光强弱的物理量。如图，点光源  $S$  发出的光在  $r$  方向上的立体角范围内的光通量为  $\Phi$ ，则发光强度  $I = \frac{\Phi}{\Omega}$ 。发光强度的单位为坎德拉，记作  $cd$ ，1 坎德拉 = 1 流明 / 1 球面度。

如果光源沿各个方向上的发光强度都相等，则称光源的发光是各向同性的，它在总光通量为  $4\pi I$ 。但大多数光源的发光强度因方向而异。上图表示一盏白炽灯加罩与否的发光强度曲线。功率为 3000 瓦的超高压短弧氙灯，发光强度最大可达 15000 坎德拉。

**光的介质** 光在其中传播的物质。又称媒质。一般指空气、水、玻璃等实体物质，有时我们把真空也称为介质。光在同一种均匀介质中是沿直线传播的，当光从一种介质到另一种介质的平滑面时，发生偏折而进入第二种介质（见“光的折射定律”），两种介质相比，偏折程度小的（即与法线的夹角小）称为光密介质，偏折程度大的称为光疏介质。光疏和光密只有相对意义。如水和玻璃相比，水是光疏介质，玻璃是光密介质；水和空气相比，空气是光疏介质，而水却成了光密介质。

介质还通常分为透明介质和不透明介质。通过透明介质，人眼可以看到发光物体。有些介质可以挡住人的视觉，显示为不透明介质，其实是挡住了可见光。对广义范围的光（电磁波），如红外光、紫外光、X 射线等，则又成为透明介质。工业、科技及一些特殊的探视，常常利用这个特点进行特殊的检测。

光在任何介质中的传播速度小于光在真空中的传播速度。光在光密介质中的传播速度小于在光疏介质中的传播速度。

**光速** 真空中电磁波的传播速度。从广义上讲，光是各种波长的电磁波，人们最初通过测量可见光的传播速度得到它的数值，因此称为光速，用符号  $c$  表示。目前国际上公认的真空中的光速  $c$  的数值为

$$c=299792458 \text{ 米/秒。}$$

早在 17 世纪前，天文学家和物理学家们就对光的传播进行过大量的研究，但均未取得较大成果。到了 1849 年，法国物理学家 A.H.L. 斐索用齿轮法首次在地面实验室中成功地进行了光速测量。他的实验装置如图所示。图中光源  $S$  发光的光束在镜面  $G$  上反射，经透镜  $L_1$  聚焦到  $O$  点，从  $O$  点发出的光束再经透镜  $L_2$  变成平行光束。经过 8.67 千米后通过透镜  $L_3$  会聚到镜面  $M$  上。再由  $M$  经原光路返回达  $G$  进入观察者眼中。置于  $O$

点的齿轮旋转时把光束切割成许多短脉冲，他用的齿轮有 720 个齿，转速为 25 转/秒达到最大光强，这相当于每个光脉冲往返所需时间为  $1/18000$  秒，往返距离为 17.34 千米，由此可得  $c=312000$  千米/秒。

1926 年，美国物理学家 A.A. 迈克尔孙用旋转镜法改进斐索的实验，测得光速的平均值为  $299798 \pm 4$  千米/秒。

1952 年，英国实验物理学家 K.D. 弗罗姆用微波干涉法测得的数值为  $299792.50 \pm 0.10$  千米/秒。这个数值一直沿用到 1973 年。

1972 年，美国标准局的 K.M. 埃文森等人采用直接测量激光频率和真空波长值的方法，用两者的乘积得出真空中光速的数值为  $299792458 \pm 1.2$  米/秒。这个数值被推荐使用到 1983 年。

1983 年，第 17 届国际计量大会通过米的新定义为：“米是光在真空中在  $1/299792458$  秒的时间间隔内行程的长度。”从而确定真空中的光速值为定义值，它的不确定值为 0，不需要再进行任何测量。

**本影** 点光源发出的光在传播过程中遇到不透明物体时，在物体后方形成的暗区。公元前 300 多年，我国《墨经》中就有关于影的说明（如图）。如果光源不是点光源，不透明物体后面的暗区情况有所不同。如图，光源（蜡烛）可以看成是若干个点光源的组合。取其中的两点 A、B，它们分别在物体后形成暗区，两个暗区的重叠部分是光线完全射不到的地方，是本影区。两个暗区各自单独存在的部分只有部分光线照到，是半影区。影的形成是光直线传播最直观的证明。

点光源生成的影区周围可以出现亮边，这是由于光的波动性，光遇到障碍物后，发生衍射的结果。

发光体越大，本影区越小。如白炽灯下的人影很清楚，荧光灯下的人影十分模糊，就是两者比较而言，白炽灯可看成是点光源，发光面小；荧光灯的发光面就比白炽灯大得多。医院里外科手术用的无影灯，就是在一个很大的圆形灯罩里交错排列或呈环形排列几个到 10 多个灯球，每个灯球里有一个镜面灯泡，灯泡下半部的内壁上涂有一层铝，把光线均匀柔和地反射到整个灯球上。这样，各个灯球都能把光线照射到手术台上，既保证有足够的亮度，同时又不留任何影子。

影在生产、生活中还有很多用途。

**半影** 见“本影”。

**日食** 月球处于地球和太阳之间在地球上形成影的现象。

月球的影可以分为本影、半影和伪半影三部分。月球绕地球的轨道和地球绕太阳的轨道都不是正圆，所以日、月同地球之间的距离时近时远。因此，在日食时，观察者在在本影范围看到太阳全部被月球遮住，称为日全食；观察者在半影内则见到太阳部分被月球遮住，称为日偏食；观察者在伪本影内见到太阳的中间部分被月球遮住，周边剩下一个光环，称为日环食（如图）。

当月球绕地球运行到太阳与地球之间几乎与太阳同起同落时，从地球上见不到月球，这时称为朔，日食现象发生在朔的时候。朔的周期约为 29.5 天。但不是每隔 29.5 天都发生一次日食，原因是月球绕地球运行的轨道平面和地球绕太阳运行的轨道平面不完全重合，两者之间有  $5^\circ 9'$  的平均夹角。所以只有当朔时太阳离两个轨道平面的交点在某一角度以内时才会发生日食。

**月食** 月球进入地球阴影，月面变暗的现象。地球在背着太阳的方向有一条阴影，叫地影（如图）。地影分为本影和半影两部分。本影没有受到太阳直射来的光，半影受到一部分太阳射来的光。月球在绕地球运行过程中进入地影后就发生月食。月球整个都进入本影发生月全食；部分进入本影发生月偏食。月全食和月偏食叫本影月食。有时月球只进入半影而不进入本影，发生半影月食（如图）。

当地球处在太阳与月球之间时，月球朝向地球的一面照满太阳光，从地球上看到月球，月球呈光亮的圆形，这叫望。望的周期与朔相同，月食只能发生在望的时候。但由于地球与月球运行轨道不在同一平面，而有一个 $5^{\circ}9'$ 的夹角，不是所有望的时候都发生月食。只有当月球运行到两个轨道平面的交点附近时，月食才可能发生。

**光的反射定律** 在光的反射现象中，确定反射光线走向的定律。是几何光学的基本定律之一。光入射到两种介质的平滑界面时，常有部分光返回到原介质中，这种现象称为光的反射现象。反射定律的内容是：

反射光线位于入射光线和法线决定的平面内；反射光线和入射光线分别位于法线的两侧；反射角 $r$ 等于入射角 $i$ 。由上述反射定律内容可知，在反射现象中，光路是可逆的（见“光路的可逆性”）。公元前11世纪，我国已使用铜镜，这是最早关于光的反射现象的研究和应用的记载。公元前4世纪，墨翟所著《墨经》中就有关于平面镜的记载。公元前3世纪，古希腊数学家欧几里德在他的著作《光学》一书中就明确阐述了反射定律。1690年惠更斯在《光论》一书中从波动说推导出反射定律，为声学及无线电波的研究奠定了理论基础。

**平面镜** 镜面为平面的反射镜。依照光的反射定律，平面镜只改变光束的方向，不改变光束的单心性，平行光束、会聚光束、发散光束经平面反射后的情况如下图所示。从图中看，平行光束反射后的光束仍为平行光束〔图(1)〕，会聚光束反射后的光束仍为会聚光束〔图(2)〕，发散光束反射后的光束仍为发散光束〔图(3)〕。

图(3)中的 $S$ 可以是物或点光源，从 $S$ 点发出的光线是发散的，经平面镜反射后，反射光线是发散的。但它们的反向延长线交于一点 $S'$ ， $S'$ 是 $S$ 的像，由于它是反射光线的反向延长线相交而成，称为虚像。虚像不能在屏幕上显示。只能用眼睛直接观察。除平面镜外，放大镜、望远镜、显微镜等的使用都是为了得到物体的虚像。

平面镜所成的虚像，可根据光的反射定律用作图法求得。如图(4)，物体 $ABC$ 置于平面镜 $MN$ 前。从 $A$ 点任意引出两条光线分别交平面镜于 $O_1$ 、 $O_2$ ，在 $O_1$ 、 $O_2$ 点作光线 $AO_1$ 、 $AO_2$ 的反射光线 $O_1P_1$ 、 $O_2P_2$ ， $O_1P_1$ 、 $O_2P_2$ 的反向延长线交于 $A'$ 点。 $A'$ 点就是 $A$ 点的虚像点。用同样的方法可得到 $B$ 、 $C$ 的虚像点 $B'$ 、 $C'$ ， $A'B'C'$ 就是经平面镜 $MN$ 所成的虚像。从成像过程可知，平面镜成像，像物等大，与镜面对称，正立、反像。

如果保持入射到平面镜的光线不变，将平面镜转过 $\theta$ 角，则反射光线将偏 $2\theta$ 角〔如图(5)〕。利用这个特点，可将微小变化放大，称为光杠杆放大作用，在物理实验中不少地方用到这一作用。

用两个以上的平面镜组成的平面反射镜组叫角镜。角镜可以有效地控制光路，常用的角镜有 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$ 两种。与两镜垂直的平面叫主截面。所有在主截面内的入射光线经角镜反射后，与入射光线的方向是镜夹角

的倍。在一些光学仪器中使用角镜，可以保证工作的可靠性。物体通过角镜后，可以成多个像，改变镜的夹角，像的个数也将随之改变。像的个数  $n$  与镜夹角  $a$  的关系为  $n = 360^\circ / a - 1$ 。如由互相垂直的平面镜组成的角镜（夹角  $a = 90^\circ$ ），像的个数  $n = 360^\circ / 90^\circ - 1 = 3$ 。

**镜反射和漫反射** 光线经光滑面发生的反射现象。镜反射遵循反射定律，反射光线是有规律的。平面镜、球面镜及各种曲面的反射都是镜反射。镜反射能生成各种像，并在适当位置和范围内能观察到。在现实中，大量的反射都不是在光滑面上进行的，反射面是粗糙的。在粗糙的表面进行的无规则反射叫漫反射。如图，光线经粗糙表面 MN 反射后，漫反射到各个方向，但就其中的每条光线而言，都遵循反射规律。一般物体，我们之所以能从各个方向看到它，就是漫反射的结果。漫反射在实际中有广泛的应用。

**球面镜** 镜面为球面的反射镜。在球面镜中，反射面为凹面的叫凹面镜，又叫凹镜。凹镜对光线有会聚作用，又叫会聚镜。反射面为凸面的叫凸面镜，又叫凸镜。凸镜对光线有发散作用，又叫发散镜。如图，球面镜的中点 O 叫顶点，顶点与曲率中心 C 的连线叫主光轴，简称主轴。平行于主轴的光线经球面镜反射后，它们的反射光线，或反射光线的反向延长线相交于一点，这一点叫球面镜的主焦点。对凹面镜而言，这一点是反射光线相交而成的，叫实焦点，用 F 表示；对凸面镜而言，这一点是反射光线的反向延长线的交点，叫虚焦点，用 F 表示。垂直于焦点的平面叫焦平面。焦点到顶点 O 的距离叫焦距，用  $f$  表示， $f = \frac{1}{2} OC$ 。

球面镜的成像可用作图法求得，其方法与透镜成像作图法相同。还可用公式法求得。设  $u$ 、 $v$  分别为物距和像距，则成像公式为  $1/f = 1/u + 1/v$ 。凹镜的成像可以是实像，也可以是虚像，虚像是放大的，实像可以是放大的，也可以是缩小的。凸镜只能成缩小的虚像。球面镜成像的大小与镜面曲率的关系，在我国战国时代就有所认识。到了宋代，科学家沈括又进一步作了正确的描述。

球面镜的用途很广泛，如望远镜的物镜，紫外显微镜的目镜等。凹镜的聚焦作用，常用于对太阳能的利用，一个约  $2\text{m}^2$  的太阳能灶 15 分钟左右可煮沸约 2 千克的水。凸镜对光线的发散作用，常用作汽车的倒视镜或马路拐弯处的反光镜。

**小孔成像** 物体（即光源）通过小孔能成倒立实像的现象。小孔成像是光的直线传播的直接证明。如图，把物体 ABC 置于挡板 P 前。在挡板上有一个小孔 O，挡板后有一屏幕 m。选择物体上的三个发光点 A、B、C，由于光沿直线传播，经小孔 O 后，在屏幕上得发光点 A'、B'、C'。由于物体 ABC 可以看作由无数个发光点组成，于是在屏幕上就得到像 A'B'C'。在小孔成像中，孔的大小和孔在屏幕的距离与成像有关，设小孔的半径为  $d$ ，其成像的最佳大小为  $\sqrt{0.6\lambda}$ 。式中  $f$  为小孔到屏幕的距离， $\lambda$  为光波波长。孔太大只能得到一个光斑，孔太小会产生衍射图样，使像变得模糊。如对  $\lambda = 5.5 \times 10^{-7}$  米的光，若小孔直径为 0.001 米， $f = 0.3$  米，则可得到较为清晰的像。

小孔成像的现象在我国古代的《墨经》中就有描述。公元 1279 年，郭守敬根据小孔成像的道理，改进了日晷，提高了夫于日影测量的精确

度。历史上最早的针孔照相机就是根据小孔成像的原理制成的。它的基本结构就是在一个箱子的一侧开一个小孔，把与小孔相对的一侧作为屏，成像后，把屏换为感光胶片，物体通过适当的时间曝光，就在胶片上留下了像。

在阳光明媚的天气里，我们常常可以在树下的地面上看到很多圆形的光斑，这并非是树叶之间的小孔，而是太阳通过小孔所成的像。有的光斑十分清晰，有的十分模糊，这与小孔的半径，树叶到地面的距离有关。

**墨翟**（公元前 478 ~ 392） 中国战国时代杰出的思想家、自然哲学家，墨家学派的创始人。墨翟及其弟子的代表作是《墨经》。书中除论述墨翟本人主张的兼爱、非攻、尚贤等观点外，还论及哲学、逻辑学和自然科学等许多问题。墨翟及其弟子十分重视对自然界的观察摹仿和研究。他们主张通过五官去研究世界，主张认识来源于亲知，提出了认识自然界的三条原则：以名指实。就是名所指的必须是实际存在的物；

以辞抒意。就是要以概念去表达判断的含义；以说其故。就是要阐明原因。《墨经》中对自然科学的论述除几何学、力学外，成就较高的是几何光学，对光源、光的直线传播、影、像、平面镜、凹面镜成像，光的反射等论述十分完善，堪称世界上最早的光学论述，在世界科学史上占有重要地位。

**光的折射定律** 是研究光由一种媒质进入另一种媒质产生偏折的规律。其内容如下：折射线、法线、入射线在同一平面内。折射线、入射线在法线的两侧。折射角的正弦与入射角的正弦的比值是一常数。如图所示。

光由光速大的媒质进入光速小的媒质，光线将向法线偏折，即光线配法线的夹角变小。光线与法线夹角正弦的比正好等于两种媒质光速之比，即

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$\alpha_1, v_1$  表示媒质 1 中光线与法线的夹角及光的传播速度； $\alpha_2, v_2$  表示媒质 2 中光线与法线的夹角与光的传播速度。

**折射率** 表示光在媒质传播时，媒质的一种特性。绝对折射率是指光由真空进入某一种媒质，入射角的正弦与折射角的正弦的比值。简称这种媒质的折射率( $n$ )，如图所示。

$$n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$$

相对折射率是指两种媒质绝对折射率的比值。如第二种媒质的绝对折射率  $n_2$  与第一种媒质绝对折射率  $n_1$  的比值叫做第二种媒质对第一种媒质的相对折射率  $n_{21}$ 。

当光由第一种媒质进入第二种媒质时，光线与法线夹角的正弦与媒质的绝对折射率成反比，则

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

两种媒质相比，我们把光速大的媒质叫做光疏媒质，光速小的媒质

叫光密媒质。光疏媒质与光密媒质相比，它的光速大，绝对折射率小，光在两种媒质间传播时，在光疏媒质，光线与法线的夹角比光密媒质光线与法线的夹角大，列表如下；

	绝对折射率	光速	光线与法线夹角
	( n )	( v )	( a )
光疏媒质	小	大	大
光密媒质	大	小	小

光疏和光密是相对而言的。空气的折射率为 1，水的折射率为 1.33，玻璃的折射率是 1.5。则水对空气而言为光密媒质，水对玻璃而言又是光疏媒质。水对玻璃的相对折射率

$$n_{\text{水玻}} = \frac{n_{\text{水}}}{n_{\text{玻}}} = \frac{1.33}{1.5} = 0.89$$

对折射率以真空为最小，等于 1，其它媒质的绝对折射率均大于 1。所以绝对折射率大于等于 1。

相对折射率可大于 1，也可小于 1。光密媒质对光疏媒质的相对折射率大于 1，光疏媒质对光密媒质的相对折射率小于 1。

**光路的可逆性** 是指光的传播路线是可逆的。利用光路的可逆性可以得出一些光的传播规律。如平行主轴的光线射向凹镜，经反射后会聚到焦点。根据光的可逆性可知：由焦点发出的一束光经凹镜反射后必平行于主轴。再如：平行于主轴的光线射向凸镜，经反射后其延长线通过焦点。根据光的可逆性可知：射向凸镜焦点的一束会聚光经反射后一定平行于主轴。又如：沿原折射光线的反方向射到界面的光线，一定按原入射光线的反方向射出。在凹镜和凸透镜成像中，如把点光源放在原来所成实像的位置，这时点光源的像一定在原来点光源所在的位置。

**全反射** 当光射到两种媒质界面，只产生反射而不产生折射的现象。当光由光密媒质射向光疏媒质时，折射角将大于入射角。当入射角增大到某一数值时，折射角将达到  $90^\circ$ ，这时在光疏媒质中将不出现折射光线，只要入射角大于上述数值时，均不再存在折射现象，这就是全反射。所以，产生全反射的条件是：光必须由光密媒质射向光疏媒质。

入射角必须大于临界角(C)。

**临界角** 是指折射角等于  $90^\circ$  的入射角。根据光的折射规律可以求出临界角的大小，如果 I 为光密媒质，为光疏媒质，光线由 媒质射向 媒质，当入射角等于临界角 C 时，折射角  $a_2$ ，正好等于  $90^\circ$ ，则：

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin C}{\sin 90^\circ} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

因为 媒质相对 媒质为光密媒质，所以， $v_1 < v_2$ ， $n_2 < n_1$

$$\sin C = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

如果光是由某种媒质（折射率为 n）射向空气（折射率近似为 1）时，则

$$\sin C = \frac{v}{c} = \frac{1}{n}$$

全反射的应用很广，如改变光的传播方向、测量折射率和传导光束等。

**光导纤维** 又称光学纤维，简称光纤，能传导光信号的纤维材料。由直径仅几微米的芯层和外层组成，主要成分是纯度很高的石英（二氧化硅）。光在纤维中不断发生全反射，从一端传导到另一端。光学纤维的内芯的折射率  $n_g$  大于外皮层的折射率  $n_b$ ，入射光光线由折射率为  $n_a$  的媒质射到 A 点，进入玻璃芯后，直射到芯与外皮层的分界面上。如图所示，只要入射角  $\frac{\pi}{2} - \alpha'$  大于临界角  $\arcsin \frac{n_b}{n_g}$  时，就产生全反射。这时

，光线由 A 端的入射角  $\alpha$  应满足：

$$\begin{aligned} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} &= \frac{n_g}{n_a} \\ \sin \alpha &= \frac{n_g}{n_a} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{n_b}{n_g} \right) \\ &= \frac{n_g}{n_a} \cos \arcsin \frac{n_b}{n_g} = \frac{1}{n_a} \sqrt{n_g^2 - n_b^2} \\ \alpha &= \arcsin \left( \frac{1}{n_a} \sqrt{n_g^2 - n_b^2} \right) \end{aligned}$$

只要光线由 A 端的入射角不大于  $\arcsin \left( \frac{1}{n_a} \sqrt{n_g^2 - n_b^2} \right)$  时，光线在玻

璃芯内就能连续不断地产生全反射，从光导纤维的一端传导到另一端。

光导纤维作为现代光通信的传光关键器件，主要有以下特点：(1)传输损耗小。一般损耗小于 20 分贝 / 千米，目前已有仅为 0.2 分贝 / 千米的超低损耗光纤问世。(2)容量大，即同时可通过的信息量大。目前已有—对光纤同时传送 150 万路电话和 2000 套彩色电视的纪录，比现有的 1800 路中同轴电缆载波通信的容量大 800 倍以上。(3)传输质量高，抗干扰、保密性好。光信号传输过程中失真、畸变、误差小，不产生也不受电磁干扰。(4)足够的强度和可挠性。不仅加工、使用方便、耐久性好，而且可以任意弯曲传光。(5)材料来源广，成本低。目前成本仅为 0.25 ~ 1.5 美元 / 千米，并在继续下降，同时节约了大量有色金属材料。

光导纤维除用于激光-光导纤维通信传感器等外已开始在空中技术、生物工程、能源工程等新技术领域大显身手，成为引人注目的基础新技术。

**光纤通信** 利用光波在光导纤维中传输信息的通信方式。由于激光具有高方向性、高相干性、高单色性等显著优点，光纤通信中的光波主要是激光，所以又叫做激光-光纤通信。

光纤通信的原理是：在发送端首先把要传送的信息（如语音）变成电信号，然后调制到激光器发出的激光束上，使光的强度随电信号的幅度（频率）变化而变化，并通过光纤发送出去；在接收端，检测器收到光信号后把它变换成电信号，经解调后恢复原信息。

光纤通信是现代通信网的主要传输手段，它的发展历史只有一二十年，已经历三代：短波长多模光纤、长波长多模光纤和长波长单模光纤。采用光纤通信是通信史上的重大变革，美、日、英、法等 20 多个国家已宣布不再建设电缆通信线路，而致力于发展光纤通信。中国光纤通信已进入实用阶段。

#### 发散光束和会聚光束

**发散光束** 是指光束的截面积不断扩大的光束。由一个点光源产生的一束光就是发散光束。

**会聚光束** 是指光束的截面积不断减小的光束。凸透镜是指中间厚度大于边缘厚度的透镜。

**凸透镜** 就其形状来说有双凸透镜、平凸透镜和凸凹透镜（中间要比边缘厚）如图所示，其代表符号为  $\uparrow$ 。凸透镜对光束有会聚作用。即，一束光通过凸透镜以后光的传播方向要向透镜的主轴偏折。原来是会聚的光束，通过凸透镜后，会聚程度增大；原来是平行的光束通过凸透镜后成为会聚光束；原来是发散的光束通过凸透镜后将减小其发散程度，甚至变成平行光束或会聚光束。

凸透镜可以产生小的、等大的和放大的倒立实像，也可以产生放大的正立的虚像。

应当注意，凸透镜对光线有会聚作用，不等于凸透镜可以把各种光束都变成会聚光束，会聚作用与会聚光束具有不同的含义。

**凹透镜** 是指中间厚度小于边缘厚度的透镜。就其形状来说有双凹透镜、平凹透镜和凹凸透镜（中间要比边缘薄），如图所示，其代表符号为  $\downarrow$ ，凹透镜对光束有发散作用，即一束光通过凹透镜以后光的传播方向要向远离凹透镜主轴方向偏折。

应当注意，发散作用与发散光束也具有不同含义。凹透镜只能产生缩小正立的虚像。

**光心光轴光心** 是指所有通过薄透镜不发生偏折的光线都通过的那一点。光轴是指通过光心的各条直线。如透镜是球面镜，则联结两球面球心的直线为主光轴，简称主轴。如透镜有一表面为平面时，则通过一个球面的球心并垂直平面的直线为主光轴。其它光轴均叫副光轴。通过光心的光线不产生偏折。

**透镜的焦点** 平行透镜主轴的光线通过透镜后的折射光线的交点（或其反向延长线的交点）。对于凸透镜，折射光线确实交于一点，这时的焦点为实焦点，对于凹透镜，折射光线是发散的，折射光线的反向延长线交于一点，这时的焦点为虚焦点。光线可以由两边射入透镜，所以每个透镜每边都有一个焦点，这两个焦点相对光心来说是对称的。

**透镜的焦距** 是光心到焦点的距离。焦距用  $f$  表示，凸透镜的焦点是实焦点，凸透镜的焦距为正值；凹透镜的焦点是虚焦点，凹透镜的焦距为负值。

**透镜的焦平面** 是指通过焦点并垂直主轴的平面，光由左向右传播，凸透镜的焦平面应通过透镜右侧的焦点；凹透镜的焦平面是指通过透镜左侧焦点垂直主轴的平面。

**实像** 某发光点发出的光通过各种光学器件折射或反射后会聚的交点。物体上的每一点均产生一个像点，这些像点的集合就是物体的像。

实像可以用光屏显示，由于光屏的漫反射，从不同的角度均可观察到光屏上所成的实像。不通过光屏显示，也可以直接用眼睛看到物体的实像。但在任何角度均可观察到，必须在实像的前方在光传播的范围内，眼睛对着光的传播方向观察，方可看到。

**透镜成像作图** 是指用作图法画出物体的像。透镜成像作图要利用三条特殊光线和一般光线的传播规律。任选其中两条即可画出物体的像。

三条特殊光线对于凸透镜是：平行主轴的光线通过凸透镜后将通过焦点。通过焦点的光线通过凸透镜后将平行主轴。通过光心的光线通过透镜后方向不变。对于凹透镜是：平行主轴的光线通过凹透镜后其反向延长线通过焦点。射向凹透镜另一侧焦点的光线通过凹透镜后将平行主轴。通过光心的光线通过凹透镜后方向不变。

一般光线的偏折规律平行副轴的光线通过凸透镜后与副轴相交于焦平面（折射光线那边的焦平面）。平行副轴的光线通过凹透镜后，其反向延长线与副轴相交于焦平面（入射光线那边的焦平面，即虚焦平面）。

因为物体的像是物体发出的光通过透镜后所有光线的交点（或其反向延长线的交点），画出物体（这里指物体上的某一点）的像，只要任选两条光线找出其通过透镜后的交点（或其反向延长线的交点）即可。图(1)是利用一条特殊光线和一条一般光线画出物体的像。AB 是凸透镜的主轴，光点 S 在主轴上，O 为光心，F 为焦点，MN 为焦平面。SO 为光点发出的一条光线，它通过透镜后方向不变，SC 为 S 点发出的任意一条光线，XX' 为平行 SC 的副轴，XX' 与 MN 相交于 D，联接 CD 延长与主轴（这时主轴可看成一条光线）的交点 S' 即为 S 的像。

用透镜成像作图分析一些问题。

例 1. 如图(2)所示，在发光点 S 与透镜之间放置一块不透光的挡板，画出 S 通过凸透镜的像。

分析：由于挡板的遮挡，由 S 发出的平行主轴的光和通过光心的光均无法射到透镜上，给作图带来困难。但我们知道，由 S 发出的通过凸透镜的光全都交于一点，尽管挡板挡住了一部分光，其它光仍交于该点，所以挡板不影响像点的位置。所以，我们可以假定无挡板，画出像点 S'，然后再由 S 点发出任意两条射到凸透镜上的光线，再与 S' 相联即可。如果由 S 射向透镜的光全被挡板挡住，则不再产生 S 的像。

例 2. 如图(3)所示，画出 AB 的(3)实像，并标出在哪个范围可以直接看到 AB 完整的像。

分析：利用两条特殊光线可以找到 A 的像点 A'，通过 A' 作 A'B' MN（主轴）交 MN 于 B'，则 B' 为 B 的像点。

连接 A 到凸透镜边缘的光线（图中只画了两条光线，实际是一圈光线）AC、AD，再连结 CA'、DA'，并延长之，在 EA'G 这一范围，逆光线的传播方向看，可以看到 A 的实像 A'。同理，连结 BC、BD 再连结 CB' 和 DB' 并延长之，则在 IB'J 范围内，逆光线的传播方向看，可以看到 B 的实像 B'，B'I 与 A'G 交于 K，则在 IKG 范围（如斜线所示范围）逆光线传播方向看，可以看到 AB 完整的像。

**透镜成像规律** 凸透镜可以得到实像也可以得到放大的虚像，凹透镜只能产生缩小的虚像。可以列表如下：

种类	物距 $u$	像距 $v$	像的性质 (大小倒正、虚实)
凸透镜	$u > 2f$ $u=2f$ $f < v < 2f$	$f < v < 2f$ $v=2f$ $v > 2f$	缩小倒立的实像 } $u$ 变小, 等大倒立的实像 } $v$ 变大, 放大倒立的实像 } 实像变大
	$u=f$		无像
	$u < f$	$ v  > u$	放大正立的虚像。 $u$ 变小, $ v $ 变小, 虚像变小
凹透镜	任意	$ v  < u$	缩小、正立的虚像, $u$ 变小, $ v $ 变小, 虚像变大

透镜成像规律可以由光路图的观察,也可以由透镜成像公式的讨论得出。

用光路图观察  $v$  随  $u$  的变化规律。

凸透镜:当物体 AB 逐渐由远移近,靠近焦点时(物距变小),由 A 点发出通过光心的光线与由 A 点发出的平行主轴的光线通过透镜后的交点将不断远离透镜,像距变大,像长变大,如图(1)所示。当物体移至焦点以内( $u > f$ ),在虚像范围内( $u < f$ ),当物体移近透镜,由 A 点发出通过光心的光线 A0 与由 A 点发出平行主轴的光线通过透镜后的折射光线 CF 只能反向延长相交,并且与物同在透镜的一侧,这时,  $|v| > u$ ,即物距变小( $u < f$ ),像距的绝对值也变小(像靠近透镜),但像长始终大于物长。如图(2)所示,像正立。凹透镜:当物体 AB 逐渐靠近透镜时,由 A 发出的通过光心的光线 A0 与由 A 发出的平行主轴的光线通过透镜后的折射光线 CD 的反向延长线(CF)的交点(虚像) A' 将右移,  $|v| < u$ ,像长始终小于物长,像正立,如图(3)所示

由透镜成像公式讨论透镜成像规律。由透镜成像公式可得:

$$v = \frac{uf}{u-f} = \frac{f}{1-\frac{f}{u}}$$

对凸透镜来说,当  $u > f$  时,  $v > 0$ ,所得的像为实像;当  $u=f$  时,  $v$  不存在,无像;当  $u < f$  时,  $v < 0$ ,所得像为虚像;当  $u > f$ ,且  $u$  逐渐变小时,  $(1-\frac{f}{u})$  逐渐变小,  $v$  变大;当  $u < f$  时,且  $u$  逐渐变小,  $|1-\frac{f}{u}|$  逐渐变大,  $|v|$  变小。即在实像范围,物距减小,像距加大(像离镜越远);在虚像范围,物距减小,像距绝对值变小(像靠近透镜)。

对凹透镜来说,  $f < 0$ ,无论  $u$  多大,  $v$  均小于零,所得像均为虚像。

由  $v = \frac{u}{\frac{u}{f}-1}$ ,无论  $u$  多大,  $|v| < u$ ;由  $v = \frac{f}{1-\frac{f}{u}}$ ,当  $u$  减小时,  $|1-\frac{f}{u}|$  变大,  $v$  变小。所以,凹透镜所成的像均为缩小的正立的虚像,物距变小,

像与镜的距离也变小。

**放大率** 是指透镜所成像的像长与物长之比，也等于像距的绝对值与物距之比，即

$$m = \frac{l_{\text{像}}}{l_{\text{物}}} = \frac{|v|}{u}$$

如果像的截面积是物的截面积的 $K$ 倍，则放大率 $m = \sqrt{K}$ 。

**物** 进入光学元件（如透镜）的光线的会聚点及其集合。可以是真实的物体，也可以是某一光学元件的像。在光学系统中，若入射光束是发散的，则物是实物，若入射光束是会聚的，则物是虚物。例如两个透镜组成的光具组，第一个透镜所成的像，就是第二个透镜的物。当第一个透镜成的像位于第二个透镜前，则此像是第二个透镜的实物，若在第二个透镜后则为虚物。对各光学元件而言，像与物是相对的，虚与实也是相对的。一般说，第一镜的虚像必是第二镜的实物，而第一镜的实像则可能是第二镜的实物，也可能是第二镜的虚物。

**放大镜** 用来观察近处微小物体的简单光学助视仪器。最简单的放大镜是一个焦距很短（1~10厘米）的会聚透镜（凸透镜）。用放大镜观察物体时，将物体放在它的第一焦点内，物体的放大虚像通过眼睛在视网膜上成实像。当我们用眼睛直接观察比较微小的物体时，若将物体放在明视距离 $d$ 处，物体所张视角 $\alpha$ 将很小，眼睛会看不清楚。若将物体移近，视角虽然比原来大了，但由于物体离眼睛太近，眼睛必须经过高度调节才能使物体成像于视网膜上，眼睛很容易感到疲劳。如果在物体和眼睛之间放一个凸透镜，把物体放在透镜焦距之内，调节透镜位置，使物体放大的虚像位于明视距离 $d$ ，这时我们就可以用增大的视角 $\alpha'$ 在明视距离 $d$ 上观察物体。这样既清楚，眼睛又不疲劳。这就是放大镜的作用。放大镜的放大率 $m$ 就是指视角增大的倍数。 $m = \frac{\alpha'}{\alpha}$ 。放大镜的

放大率还可用 $m = \frac{d}{f}$ 计算， $d$ 为明视距离， $f$ 为焦距。放大率是放大镜的重要性能参数，常用“ $x$ ”表示。如3倍写作“3x”。透镜的焦距 $f$ 越小，放大率越大。但是实际上 $f$ 增大，透镜球面曲率也增大，像差也会增大。为使像差不至过大，一般单透镜放大镜的放大率不超过3倍。若用透镜组做成复合式放大镜，可以减小像差，同时又可以使放大倍数增大到15~20倍。这种放大镜常用来观察光学系统所成的像。因工作时靠近眼睛，又称作目镜。必须注意，放大镜的放大率与透镜的横向放大率是不同的。前者是指视角的变化，后者说的是物与像之间线度的变化。

**望远镜** 用来观察远而大的物体的光学仪器。由物镜和目镜组成。一般它的物镜焦距较长，目镜焦距较短。物镜通常是凸透镜，目镜可以是凸透镜，也可以是凹透镜。物镜是凸透镜，目镜是凹透镜的望远镜称做伽利略望远镜。物镜和目镜都是凸透镜的望远镜称做开普勒望远镜。任何望远镜都是使远处的物体经物镜成实像，再以此实像为物经目镜成像。因为实物的视角远大于远处物的视角，使我们能看清远处的物体。望远镜并不能将实物放得更大，而只能将实物在视觉上移近一些，达到增大视角的目的。如视角增大20倍时，物理和眼的距离就好像缩短到

$\frac{1}{2}$ 。望远镜的放大率  $m = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$ 。  $f_1$  是物镜的焦距，  $f_2$  是目镜焦距。

望远镜的分辨本领也是它的一个重要参数。用刚好能分辨的远方两个物点对物镜的张角来量度。该角称为望远镜的最小分辨角，用  $\theta$  表示。

1.22  $\lambda/D$ ，  $D$  为物镜的直径。可见为了提高分辨本领，就要加大物镜的直径，但这同时又会加大像差。大型望远镜采用反射式物镜，可以消除色差。大型天文望远镜的分辨本领还会因大气扰动而降低，为了减小这种影响，往往将天文望远镜架设在高山上。

第一架望远镜是在 1608 年由荷兰工匠 H. 李普希用一个凸透镜和一个凹透镜制成的。目前望远镜的种类很多。按工作原理分有反射式望远镜、折射式望远镜、折反射式望远镜；按用途分有天文望远镜、观察用望远镜、测量用望远镜等。

**开普勒望远镜** 物镜和目镜都是凸透镜的望远镜。是德国天文学家开普勒在 1611 年发明的。这种望远镜的物镜后焦点和目镜前焦点重合，因此它的物镜与目镜之间的距离（即筒长）等于物镜和目镜焦距之和。物体 AB 射到物镜  $O_1$  上的光线经折射后，在物镜  $O_1$  的后焦平面（同时也是  $O_2$  的前焦平面）附近形成一个缩小的倒立实像  $A_1B_1$ ，再经目镜  $O_2$  折射后，成倒立虚像于无穷远处。从图可以看到远方物体 AB 对物镜所张视角  $\alpha$ ，远小于物镜所成实像  $A_1B_1$  对目镜所张视角  $\alpha'$ 。视角的张大，

使我们感到物体离我们近了。由图可知，开普勒望远镜的放大率  $m = \frac{\alpha'}{\alpha}$

$\approx \frac{\text{tg}\alpha'}{\text{tg}\alpha} = \frac{A_2B_2}{f_2} \bigg/ \frac{A_1B_1}{f_1} = \frac{f_1}{f_2}$ 。开普勒望远镜的镜筒较长，所成的像是

倒立的，不便于用来观察地面物体。但它的视场比伽利略望远镜大，而观察天体又无所谓正、倒，因此从 17 世纪中叶起，多用开普勒望远镜来观察天体，因而又称它为天文望远镜。由于筒内所成的是实像，若在实像处安装叉丝和刻度尺，就可以瞄准和定位，观测起来就更方便、准确了。现代天文望远镜中，还可在物镜焦平面处安放照相底片，各种辐射探测器及摄谱仪等，使科学家们可以对宇宙空间作更深入、广泛的研究。如果在开普勒望远镜中加上一组回转棱镜组成的倒像系统，不仅可使所成像正立，还可缩短镜筒。这种望远镜又叫棱镜望远镜。双筒的棱镜望远镜常用于航海、军事和其它野外观测中。

**伽利略望远镜** 物镜是凸透镜、目镜是凹透镜的望远镜。第一架伽利略望远镜是由荷兰工匠李普希于 1608 年制成的。1609 年伽利略制成了一架放大倍数达 32 倍的这种望远镜，并用它做了许多天文观察，发现了木星的卫星和月球表面的山谷，因此称它为伽利略望远镜。这种望远镜的物镜后焦点与目镜的后焦点重合，因此它的筒长（也就是物镜与目镜的距离）等于两透镜的焦距之差。下图是伽利略望远镜的光路图。从远处物体 AB 一端发出的光线（近似为平行光线）经物镜  $O_1$  折射后，本应会聚在  $O_1$  的后焦平面附近，成一倒立实像  $A_1B_1$ 。但在会聚成像前，就被目镜  $O_2$  这个凹透镜折射成发散光束。这些发散光束的反向延长线的会聚点形成物体的正立虚像  $A_2B_2$ 。当眼睛对着目镜观察时，看到的就是这个虚

像。远处物体 AB 对物镜  $O_1$  所张的视角为  $\alpha$ ，虚像  $A_2B_2$  对眼睛所张视角为  $\alpha'$ ，显然  $\alpha' > \alpha$ 。由图可知  $\alpha = \text{tga} \frac{A_1B_1}{f_1}$ ， $\alpha' = \text{tga} \frac{A_1B_1}{f_2}$ ，

所以放大率  $m = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2}$ 。由此式可知，物镜焦距越大，目镜焦距越小，

放大率越大。但伽利略望远镜的视场较小，且视场随着放大率的增大而减小。为使视场不致太小，一般放大率在 2~6 倍间。由于伽利略望远镜最后所成的像是正立的虚像，所以适合用来作地面观察。例如观测时常用的双筒望远镜就是由两个伽利略望远镜组成的。伽利略望远镜筒中没有实像形成，不能放置叉丝和刻度尺，因此不能作定位和瞄准用，只能用作一般观察。

**折射望远镜** 用透镜组成的望远镜。分伽利略望远镜和开普勒望远镜两种（详见伽利略望远镜、开普勒望远镜）。最早的折射望远镜是 1608 年由荷兰工匠李普希制造的。最大孔径的折射望远镜是美国凯斯天文台上的天文望远镜，其物镜是直径为 1 米的凸透镜。折射望远镜的缺点是有色差，且大口径透镜很难制作。

反射望远镜用反射镜作物镜的望远镜。其物镜一般是凹镜，目镜是凸透镜。由于反射镜无色差，且加工比透镜容易，因此物镜凹面可以做得很大。大型的天文望远镜多用这种反射镜。最早的反射式望远镜是由牛顿于 1672 年用抛光铜锡合金制成的。牛顿望远镜的物镜由旋转抛物面反射镜和平面镜组成。其光路如图所示。由无限远处射来的平行光线经抛物面镜 M 反射到平面镜 M'，由 M' 反射后成像于 F'，再通过目镜放大，除牛顿望远镜外，还有物镜由旋转抛物面镜和旋转椭球面镜组成的格雷戈里望远镜和物镜由旋转抛物面镜和旋转双曲面镜组成的卡塞格仑望远镜等。目前世界上最大的反射式望远镜直径达 6 米，是由前苏联制造的，安装在高加索的帕斯图霍夫山上。我国 1987 年也制成了直径达 2.16 米的反射天文望远镜。1989 年 11 月安装在北京天文台兴隆观测站。

**显微镜** 将人眼所不能分辨的微小物体放大成像，以供观察的光学仪器。显微镜主要由一短焦距的物镜和一长焦距的目镜组成。物镜和目镜各相当于一个凸透镜。被观察物体 AB 位于物镜的第一焦点前，被物镜作第一级放大后，在目镜的第一焦点内成一倒立的实像  $A_1B_1$ ，再被目镜作第二级放大，成一放大虚像  $A_2B_2$ 。眼睛看到的，就是这个虚像。显微镜的放大率等于物镜的横向放大率与目镜的角放大率的乘积。显微镜的分辨本领指物镜的分辨本领，用能被显微镜清晰区分的两个物点的最小间距  $\delta$  表示。  $\delta = \frac{0.61\lambda}{n \cdot \sin u}$ ，式中  $\lambda$  为所用光波的波长，n 为物体所在

空间的折射率，u 为半孔径角。 $n \cdot \sin u$  称作数值孔径，其数值越大，分辨本领越高。数值孔径是显微镜的重要性能指标，通常与放大率一起标注在物镜筒外壳上。例如  $40 \times 0.65$  表示物镜放大率为 40 倍，数值孔径为 0.65。提高显微镜分辨本领的途径一是提高物体所在空间的折射率 n，如油浸物镜；二是采用较短波长的光波。如采用紫外线的显微镜，其分辨本领可达 0.1 微米。而电子显微镜使用高速电子束成像，其分辨本领比光学显微镜高 1000 倍。

早在 1590 年，荷兰和意大利的眼镜制造者们就造出了类似显微镜的放大仪器。1610 年前后，伽利略和开普勒在研究望远镜的同时，得到显微镜的合理光路结构。1665 年前后，英国的 R·胡克在显微镜中加进了调焦机构、照明系统和承载标本片的工作台，这些部件经过不断改进，成为现代显微镜的基本组成部分。1675 年左右荷兰的列文虎克制造出放大率达 200 多倍，分辨率为  $1.4 \times 10^{-6}$  米的显微镜。19 世纪末德国科学家阿贝对显微镜的设计理论做出了重要贡献，并研制成复消色差显微镜。随着科学技术的发展，人们造出了分别应用于生物学、医学、农业、地质、工业等不同领域的各类显微镜。如偏光显微镜、紫外荧光显微镜、红外显微镜、金相显微镜、双目体视显微镜、扫描显微镜等。

**螺纹透镜** 一种密纹阶梯透镜。阶梯透镜又称环带透镜或菲涅耳透镜，是一种消球差的大孔径聚光透镜。由法国科学家菲涅耳发明，并成功地应用于灯塔上。将平凸透镜的表面分成许多同心环带，每一环带都有聚光作用，但焦距略有不同。由于透镜的聚光性能主要取决于表面曲率，所以去掉图中画有斜线的部分，将不会影响它的聚光性能。将剩余部分进行调整，使各环带焦点重合，就成为一个表面成阶梯状的透镜，即阶梯透镜。一面为环状阶梯面，另一面为平面的称平面型阶梯透镜；一面为球心位于光轴上的球面，一面为阶梯面的称弧面型阶梯透镜。环带宽小于 1 毫米的密纹阶梯镜又称作螺纹透镜，常用作书写投影仪的聚光镜、照相机的取景镜和电视放大镜，也可用作各类照明灯具中的大孔径聚光镜。阶梯透镜一般用塑料或有机玻璃，采用精密浇铸和热压工艺做成。具有重量轻、成本低的特点，可以大批量生产。

**照相机、电视摄像机** 照相机是利用胶片感光作用记录物体实像的光学仪器。主要由镜头、快门、暗箱等部分组成。镜头又叫物镜，是照相机上最主要的光学部件。从物体射来的光线通过镜头后，在胶片上成一倒立实像。镜头一般由多片透镜组成，以消除各种像差。常见的镜头有标准镜头、长焦距镜头、广角镜头、变焦距镜头、微距镜头和鱼镜头等。不同的镜头其视角、焦距各不相同，用途也各不相同。最常用的是标准镜头，其视角一般在  $40 \sim 55$  度之间，焦距约等于所成照片的对角线长。用它拍出的照片，接近人的视觉所得影像。光圈是附在镜头上用以控制镜头有效通光孔径的装置，用金属薄片做成，可以自由开合。光圈开合的大小用光圈标度（也称 f 数或光圈数）来表示。国际通用的光圈标度为：2、2.8、4、5.6、8、11、16、22、32。数字越大、光圈口径越小，进光量越少。快门是用来控制曝光时间的装置。分叶片式和帘幕式两种。叶片式快门其结构与光圈类似。快门速度标记常见的有 1、2、4、8、15、30、60、125、250、500、1000 以及 B 等。分别指快门开启时间为 1,  $2/3$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ .....秒。快门速度标记数字越大，快门开启时间越短。光圈与快门配合，能准确有效地控制曝光量。暗箱是摄影镜头与感光片借以联系的不透光箱体。它的主要作用是使镜头能够自由伸缩而不透任何非镜头折射光。分固定式、伸缩式和折合式三类。现代照相机除镜头、快门、暗箱这几个主要部分外还有输片装置和取景器等辅助装置。照相机的种类很多，常见的有 135 型照相机、120 型照相机、110 型照相机，即影照相机、技术照相机、电子照相机等。

电视摄像机是将光学图象信号转变成便于记录或传输的电视信号的

仪器。一般由光学系统、光电转换器件、预放器、图象信号处理系统、扫描系统、寻像器和电源等部分组成。光学系统主要包括镜头、色温转换滤光片和分色系统。摄像管是一种光电转换器件，可将进入的光信号转变为电信号。预放器是将摄像管输出的微弱电信号放大到一定幅度(约0.7V)后，再送到图象信号处理系统进行各种处理，以符合电视信号传输的要求。偏转聚焦系统的作用是使摄像管电子枪发出的电子按照规定方式对靶面进行扫描。由聚焦线圈和场偏转线圈组成，并与摄像管制成一体。寻像器是一个小屏幕监视器，供摄像人员取景、调焦和观察画面实际效果用。此外摄像机还有脉冲电路、各种调节电路和电源电路等。摄像机按颜色分有黑白彩色两种，彩色的又分单管彩色摄像机、双管彩色摄像机和三管彩色摄像机三种。三管彩色摄像机的彩色还原好、要求照度低、图象清晰，是较理想的摄像机。

**幻灯机、电影放映机** 幻灯机是利用透镜成像原理，将透明图片放大并成像于屏幕上的光学器具。主要由反光镜、光源、聚光镜、放映镜头等组成。由光源发出的光线，经聚光镜均匀地照射在幻灯片上，通过幻灯片后又聚集到放映镜头上，放映镜头使幻灯片在屏幕上成一放大倒立的实像。反光镜是装在光源后面的凹面镜，其作用是把光源向后发射的光线反射回来，以增强幻灯片投射到屏幕上的亮度。幻灯机的光源一般是100~300W 卤钨灯，为延长灯泡使用寿命，还装有冷却风扇。聚光镜一般由两块平凸透镜组成，其大小比幻灯片画面略大。放映镜头分固定焦距和可变焦距两种。常用的是可变焦距放映镜头（又称活动放映镜头）。这种镜头由两部分组成：镜头后部为一正透镜组，可使影片画面形成初级影像；镜头前部的透镜组相当于一个可变倍数的望远镜，由两个凸透镜和一个凹透镜组成，改变透镜间的距离，可改变整个放映镜头的焦距，可以在同一屏幕上进行不同距离的放映。幻灯机的种类很多，分类方法也不同，如按功能分有平动式、自动式、遥控式及声画同步式等多种。

电影放映机是把电影胶片上的各个画幅连贯而又等速地反映在银幕上的机器。电影放映机一般由输片、动力传动、光学、还音和电路五大系统组成。其工作原理如图。其中光学系统又可分为照明光学，放映光学和还音光学三大部分。照明部分主要包括放映灯泡、反光镜、聚光镜等。常用放映灯泡有弧光灯、氙灯、钨灯等。放映光学部分主要是放映镜头。它是使银幕获得明亮、清晰和放大影像的主要光学部件。一般是由数片性能不同的凸透镜和凹透镜嵌放在内壁涂有防漫反射光黑色涂料的金属圆筒电影放映机原理图内组成的。放映镜头分普通电影放映镜头和宽银幕放映镜头两大类。还声光学部分由激励灯和激励镜头组成。激励灯是发出光流去激励光电元件使之产生音频电流的光源，是激励镜头的光源。激励镜头由两片柱形平凸透镜排列在镜筒中组成。其主要作用是把激励灯射来的光聚集成一条细长的光刃，投射在移动的影片声带上，影片声带使透过它的光通量发生变化，再由光电元件使变化的光通量转化为变化的电流，将电流放大后通过扬声器还原为声音。电影放映机规格繁多，常用的有70mm 固定式放映机、35mm 放映机、16mm 放映机、8mm 放映机等。

**投影仪** 常用的投影仪有书写投影仪、实物反射式投影仪和显微投

影仪等。

书写投影仪是一种能把在透明胶片上书写的文字和图象立即投射在屏幕上的光学器具。多用于课堂教学。其光路如图所示。在紧靠聚光镜  $L_1$  处有一块平板玻璃  $P$ ，上放透明胶片。在透明胶片上书写的文字通过透镜  $L_2$  和反射镜  $M_2$  在屏幕上成一放大实像。聚光镜常用有机玻璃螺纹透镜，其面积较大，便于书写和演示各种教学投影片。

显微投影仪是一种直射与反射相结合的投影仪。是在显微镜下面加一个光源箱，在显微镜头上加一反射镜而构成的。可将各种切片和微生物标本进行直接投影。也可用于显微镜的图象投影，可供多人观察研究。主要由光路、散热及电器等系统组成。

实物反射投影仪为卧式反射光学投影仪。能直接将教材、书刊、图表等印刷品的实物投影在屏幕上。由光源发出的光经隔热玻璃吸收大量的红外线后，投射到放在托板上的印刷品画面上，经反射后到达反光镜，再由反光镜反射进物镜，最后在屏幕上形成比实物大 4~5 倍的像。这种投影仪的光源一般用发光效率很高的 D1000 镝灯。

**眼睛** 视觉器官。眼睛和照相机相似，一部分是光学成像系统，能够保证在视网膜上形成外界物体清晰的像；另一部分是与照相底片相似的感光层，即视网膜上的感光细胞及其外段的光敏色素。眼睛的构造如上图。

眼球近似于球体，内部的角膜、水样液、晶状体及玻璃体构成屈光系统，起到一个双凸透镜的作用。眼睛比照相机机构要复杂得多。除了有一套自动调节控制机制外还能把光携带的信息变成神经电信号并经过初步加工处理传到大脑。

眼睛有一套自动调节控制机制，即能使远处的物体成像在视网膜上，也能使近处的物体成像在视网膜上。其原因是晶状体本身是有弹性的，可以靠周围肌肉的运动改变它的表面的弯曲程度，从而改变其焦距。因此眼睛是一种精巧的变焦距系统。眼睛要看清一个物体，除了像要成在视网膜上以外，还需要成在视网膜上的像足够的明亮，这主要靠瞳孔的调节，瞳孔的大小是可以改变的，改变它就可以控制进入眼球的光线的多少，它的作用像照相机的光圈。另外眼睛要看清楚一个物体还要满足第三个条件，就是物体的两端对眼睛光心所张的视角要大于 1 分。当物体对眼睛所张的视角小于 1 分的时候，在视网膜上所成的像就会落在同一个感光细胞上，整个物体看上去就会缩成了一点无从分辨。

物体上射出的光一部分进入眼睛在视网膜上成一实像，我们就看清了物体。眼睛不仅能看清物体，而且还能看清物体通过光学系统所成的虚像，虚像是反射光线或折射光线的反向延长线形成的，但这些反射光线或折射光线进入眼睛后能在视网膜上成一实像如图。

人们眼球的焦距只有 1.5 厘米左右，所以观察的物体一般总在眼睛的两倍焦距以外，它在视网膜上所成的像是缩小倒立的实像，由于长时间的感受已养成习惯，脑神经能清楚地识别各种物体，不至有上下倒置、左右易位的感觉。

**立体视觉** 视觉暂留 双眼同时观察同一景物时所产生的立体视觉效应，因为人的两眼之间有一定的距离，当用两眼看同一物体，物体在两个视网膜上所成的像有些差别，经大脑综合使人们对物体有一立体感

觉。这种效应的具体应用是立体照相和立体电影。

光对视网膜所产生的视觉在光停止作用后，仍保留一段时间的现象，是视觉暂留，其具体应用是电影的拍摄和放映。

**近点 远点 明视距离** 眼睛经过调节所能够看得清楚的最短距离。眼睛能够看得清楚的最远距离。眼睛比较习惯的物和眼的适当的距离，这时眼睛不容易感到疲劳，这个距离是眼睛的明视距离。对正常眼睛讲，这个距离大约为 25 厘米。

为了使物体成像在视网膜上，对于远近不同的物体需要用睫状肌来改变晶状体的位置和它的曲率来加以适应。当睫状肌放松时，晶状体曲率减小，眼睛的焦距增大，可使远处的物体成像在视网膜上，正常人眼睛的远点是无穷远。假使要看清楚近处的物体，就得收缩睫状肌，一方面使晶状体略向前移动，一方面使它的中央部分变厚，曲率增大于是眼睛的焦距减小。但是这种调节也有一定限度。如果物体离开眼睛的距离，移近到某一个一定的数值以后，即使晶状体的曲率调节到最大也不能使物体的像成在视网膜上，这个距离就是近点。年青人的正常眼睛近点约在 10 厘米左右。

在这里应该指出，正常人眼睛的远点为无穷远，近点为 10 厘米左右是指在这样距离的物体，均能在视网膜上成一清晰的像。近视眼的远点为几十厘米说明几十厘米以外的物体在视网膜的像是模糊的，物体越远视网膜上的像越模糊，因此不要把看见物体和看清楚物体相混淆。当然看清楚物体的条件除了在视网膜上成清晰的像外，还应有一定的亮度、物体对眼睛所张的视角大于分的条件。

**近视眼** 一种远点为有限距离的非正常眼，这种眼睛的折光本领比正常的眼睛大些，或者角膜到视网膜的距离比正常的眼睛长些。晶状体在曲率最小的时候，也不能把平行光束会聚在视网膜上（而是聚在视网膜前），这种眼睛远点不是无限远，只适于看较近的物体，近点也比 10 厘米小，要使这种眼睛能够看清楚无限远的物体，必须把物体在视网膜前所成的像，移到视网膜上。矫正近视眼的方法是配带一副用凹透镜做的眼镜，利用这种透镜对于光束的发散作用可以使得物体所成的像远一点，刚好成在视网膜上。青少年多患近视眼，因此应该注意眼睛的保健。

**远视眼** 一种近点变远的非正常眼。这种眼睛的晶状体的折射本领比正常的眼睛小些，或者角膜到视网膜的距离比正常的眼睛短些，晶状体在曲率最小的时候，无限远处物体的像，成在视网膜的后面，要经过调节才能看清楚无限远处的物体；较近处物体的像成在视网膜的更后面一些，要看清楚物体晶状体需做更大的调节。矫正远视眼的方法是戴一副凸透镜做的眼镜。利用这种眼镜对光的会聚作用，使得物体所成的像移近一些，刚好成像在视网膜上。

**眼镜** 用来矫正视力缺陷或保护眼睛的简单光学仪器。近视镜是用凹透镜制成，远视镜和花镜是用凸透镜制成。矫正散光眼的方法是戴柱形透镜做的眼镜，配戴这些眼镜的目的在于把物点成像在有缺陷的眼睛的近点或远点，再由眼睛成像在视网膜上。

例如某人选配焦距为 50cm 的凸透镜，使视力正常，那么这个患者不戴眼镜时近点应是多少？正常人眼睛的近点是 10cm，配带眼镜的目的把 10cm 处的物点成像到此视力不正常眼睛的近点，因此此眼镜物距为

10cm，焦距50cm。所求即为像距，应用公式  $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ， $v = -12.5\text{cm}$

因此，此有缺陷的眼睛是用一凸透镜，把 10cm 物点成像在 12.5cm 处，有缺陷的眼睛再把 12.5cm 处的像成在视网膜上。

选配眼镜要测试出度数，为了搞清什么是度数，应先知道什么是透镜的焦距，透镜焦距D定义为透镜焦距的倒数即  $D = \frac{1}{f}$ ，f的单位是米，

D 的单位是屈光度。1 屈光度 = 100 度。透镜的焦距有正负，因此透镜焦距也有正负。比如有一学生只能看清 50 厘米远处的物体，说明远点是 50 厘米，正常人的远点是无穷远，所以此同学为近视眼，要使他像正常人一样，使无穷远的物体成像在视网膜上，应该配用凹透镜。使无穷远处物体成像在 50 厘米处，只有这样才能使物体清晰地成像在视网膜上。要

计算所配眼镜的度数，应先算出焦距  $D = \frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{0.5}$  屈光度 = - 2

屈光度 = - 200 度。其中负号表示焦距为负值，焦点为虚焦点，是凹透镜。由此可知此学生应配带 200 度的近视镜。

眼镜还可对眼睛起到保护作用，如有防风沙的防风镜，防止太阳紫外线照射的太阳镜，以及各种劳动保护眼镜，为了美观或有些职业需要近年又出现了隐形眼镜。立体眼镜是在观看立体电影时戴上的由两块正交偏振片做成的眼镜。近日报载日本东海光学公司，最近制成高强度树脂眼镜片，这种镜片的强度很大。

**棱镜** 用透明材料制成的多面体，是重要的光学元件。光线入射出射的平面叫侧面，与侧面重直的平面叫主截面。根据主截面的形状可分成三棱镜、直角棱镜、五角棱镜等。三棱镜的主截面是三角形，有两个折射面，它们的夹角叫顶角，角所对的平面为底面。根据折射定律光线经过三棱镜，将两次向底面偏折，出射光线与入射光线的夹角叫做偏折角。其大小由棱镜介质的折射率  $n$  和入射角  $i$  决定。当  $i$  固定时，不同波长的光有不同的偏折角，在可见光中偏折角最大的是紫光，最小的是红光。如图(1)。从物体射出的光线通过棱镜也会成像如图(2)。隔着棱镜观看物体，经过棱镜两次折射的光线进入眼睛，光线好像是从它们反向延长的交点 A 发出来的一样，A 点就是 A 点的虚像。图(2)是光线从空气（光疏媒质）射入玻璃棱镜（光密媒质）的情况。如果光线是从光密媒质射入光疏媒质的棱镜，情况就恰好相反。例如将一个空心的薄玻璃制成的棱镜（里面是空气）放在水里，这时候光线从水射入空心棱镜（空气），将会向顶角偏折如图(3)所示。隔着空心棱镜（在水里）看物体的虚像偏向棱镜的底面。用反射棱镜可改变光路。光线从棱镜的一个折射面正入射（入射角是零度）当光线投射到斜面上的时候，入射角正好是  $45^\circ$ ，大于玻璃的临界角（约  $42^\circ$ ），所以就发生了全反射，最后从另一个折射面垂直地射出去，使光路转过了  $90^\circ$ ，利用两个这样的棱镜组成一个潜望镜如图(4)。还可利用棱镜把物体的像倒转过来如图(5)所示。

**光的色散** 复色光分解为单色光而形成光谱的现象。让一束白光射到玻璃棱镜上，光线经过棱镜折射以后就在另一侧面的白纸屏上形成一条彩色的光带，其颜色的排列是靠近棱镜顶角端是红色，靠近底边的一

端是紫色，中间依次是橙黄绿蓝靛，这样的光带叫光谱。光谱中每一种色光不能再分解出其他色光，称它为单色光。由单色光混合而成的光叫复色光。自然界中的太阳光、白炽电灯和日光灯发出的光都是复色光。

光波都有一定的频率，光的颜色是由光波的频率决定的，在可见光区域，红光频率最小，紫光的频率最大，各种频率的光在真空中传播的速度都相同，等于  $c = 3 \times 10^8$  米/秒。但是不同频率的单色光，在煤质中传播时由于受到媒质的作用，传播速度都比在真空中的速度小，并且速度的大小互不相同。因为光传播速度的改变而发生折射，折射率  $n = \frac{c}{v}$ ，在同种媒质中红光传播速度大，紫光的传播速度小，因此媒质对红光的折射率小，对紫光的折率大。当不同色光以相同的入射角射到三棱镜上，红光发生的偏折最少，它在光谱中处在靠近顶角的一端。紫光的频率大，在媒质中的折射率大，在光谱中也就排列在最靠近棱镜底边的一端。

夏天雨后，在朝着太阳那一边的天空上，常常会出现彩色的圆弧，这就是虹。形成虹的原因就是下雨以后，天上悬浮着很多极小的水滴，太阳光沿着一定角度射入这些水滴发生了色散，朝着小水滴看过去就会出现彩色的虹，虹的颜色是红色在外紫色在内依次排列。

**物体的颜色** 物体在白光照射下所呈现的颜色。太阳光或电灯发出的光是由多种颜色的光融合起来的复色光。每一种色光都对应着一定的波长或频率。光的频率不同，人眼就得到不同色彩的感觉，所以颜色是不同波长或频率的光作用于人眼所引起的一种视觉反映。

不发光物体可分为透明体和不透明体两种，它们的颜色均决定于物体对光的选择性吸收和选择性反射，当白光照射到某种颜色的透明体上时，所能透过的主要是跟透明体同一种颜色的色光，其它色光都几乎被透明体所吸收。如果透明体允许各种色光都同样地透过它，那么这种透明体就是无色透明体，如玻璃、空气、清水等。而某种不透明体用白光投射到它的表面上时，物体所能反射的主要是跟物体表面同一种颜色的色光，其它频率的色光几乎都被物体的表面所吸收，所以不透明体的颜色是由它所能反射出的色光来决定的。物体的表面如果能够把白光中所有色光几乎全部地吸收掉，这就是黑色的不透明体。如果能够把各种色光几乎全部地反射出来这是白色的不透明体。因此若用不含红色光的光源照射红色物体，此物体不是红色而是黑色了。这就是平时在商店里选购衣料，在室内看颜色比较满意而在太阳光下又不称心，其原因是大商店用日光灯照明，其光色不如太阳光全造成的。

一些物体特别是金属，它们对某些波长的光反射率大，而对其它波长的光反射率小，于是反射光就呈现反射率大的光的颜色。例如在白光的照射下纯铜的反射光是紫红色。但是大多数物体对各种波长的光的反射作用相同，因而呈现白色。如黑板的反光是白色。

单色光的混合与不同颜料的混合是不同的。比如黄颜料和蓝颜料混合得到绿色，原因是黄颜料除了主要反射黄色光以外，还可以反射一些和它邻近的橙光和绿光，而蓝颜料除了主要反射蓝光外，还会反射一些和它邻近的绿光和靛光，将其混合黄颜料吸收蓝光靛光，蓝颜料吸收橙光和黄光，唯一反射的只有绿光。这样画家们只用有限的几种颜料可以

调出千变万化的色彩来。

**光谱** 复色光经过色散系统分光后按波长的大小依次排列的图案。例如太阳光经过分光后形成按红橙黄绿蓝靛紫次序连续分布的彩色光谱。有关光谱的结构，发生机制，性质及其在科学研究、生产实践中的应用已经累积了很丰富的知识并且构成了一门很重要的学科——光谱学。光谱学的应用非常广泛，每种原子都有其独特的光谱，犹如人们的“指纹”一样各不相同。它们按一定规律形成若干光谱线系。原子光谱线系的性质与原子结构是紧密相联的，是研究原子结构的重要依据。应用光谱学的原理和实验方法可以进行光谱分析，每一种元素都有它特有的标识谱线，把某种物质所生成的明线光谱和已知元素的标识谱线进行比较就可以知道这些物质是由哪些元素组成的。利用光谱不仅能定性分析物质的化学成分，而且能确定元素含量的多少。光谱分析方法具有极高的灵敏度和准确度。在地质勘探中利用光谱分析就可以检验矿石里所含微量的贵金属、稀有元素或放射性元素等。用光谱分析速度快，大大提高了工作效率。还可以用光谱分析研究天体的化学成分以及校定长度的标准原器等。

**分光镜** 将复色光分解为光谱并对其进行观察的仪器。其结构图为：管 A 叫做平行光管，在靠近棱镜 P 的那端有一个凸透镜  $L_1$ ，管的另一端附有一个宽度可以调节狭缝 S，它的位置刚好落在透镜  $L_1$  的焦平面上。光源发出的光通过  $L_1$  折射后成为平行光束射到三棱镜上发生色散。红光偏折最小，紫光偏折最大。B 管叫望远镜，靠近棱镜的凸透镜  $L_2$  是物镜，另一端的凸透镜是目镜  $L_3$ 。从棱镜射来各种颜色的平行光束经过  $L_2$  会聚在焦平面 MN 上形成光谱。MN 在目镜的焦平面以内，因此从目镜可看到光谱的放大虚像。C 管叫标度管，它靠近棱镜的一端有一个凸透镜  $L_4$ 。在  $L_4$  的焦平面处有一个玻璃刻度尺，用光源照亮这个标度尺，于是刻度尺上的标线会经  $L_4$  的折射成为平行光束再经棱镜的一个折射面的反射进入望远镜筒 B 里，在焦平面 MN 处构成刻度尺的像，因此从目镜  $L_3$  看到落在刻度尺背景上的光谱可以很方便地确定光谱的位置。

**摄谱仪** 将复色光分解为光谱并且能拍摄光谱照片的仪器，其部件与分光镜相同，即平行光管 A、望远镜 B 和标度管 C。区别仅在透镜  $L_2$  的焦平面 MN 处置放底板，就能把光谱的照片拍摄下来供反复仔细地比较和研究。

**发射光谱** 处于高能级的原子或分子在向较低能级跃迁时产生辐射，将多余的能量发射出去形成的光谱。要使原子或分子处于较高能级就要供给它能量这叫激发。被激发的处于较高能级的原子、分子向低能级跃迁放出频率为  $\nu$  的光子。光子能量满足  $h\nu = E_i - E_j$ ， $h$  为普朗克常数， $E_i$ 、 $E_j$  分别为高、低能级能量。在原子光谱的研究中多采用发射光谱，例如氢原子处在正常状态时电子是在离校最近的  $n=1$  的可能轨道上运动，这时它的能量最少也比较稳定。当原子受到外界因素的激发时电子吸收一定的能量而跃入其他能量较高的可能轨道上去，这时电子不稳定。它能自发地跳跃到较低能级的可能轨道上并发出一个光子，从不同的能量较高的可能轨道上跳跃到同一能量较低的可能轨道上来时所发出

的谱线却属于同一线系，若电子从 3、4、5、6……等可能轨道上跳跃到  $n=2$  的可能轨道上时所发出的谱线却属于巴尔末线系。大量的处于激发态的氢原子会发出各不相同的谱线组成了氢原子光谱的全部谱线，由于产生的情况不同，发射光谱又可分为连续光谱和明线光谱。

**连续光谱** 光强度随频率变化呈连续分布的光谱。包含由红到紫各种色光在内的连续彩色光带。按量子力学的观点，原子、分子在两个能级间跃迁时产生光子的频率  $\nu = E_i - E_j / h$ ，若  $E_i$ 、 $E_j$  中任何一个（或两者）的数值可连续变化，则  $\nu$  的数值也连续变化就会产生连续光谱。如氢原子光谱中每个线系趋于一个短波极限，波长短于这个极限就出现一个光谱的连续区，这个极限称线系限。如图为氢原子巴尔末线系的连续光谱区。它从  $H_7$  即巴尔末线系的第七条线 ( $n=7$ ) 开始。H 表示线系限的理论位置。连续光谱是固体或液体在高温下所发出的光生成的，如弧光灯的炭粒发光，温度高达 4000 。熔融的钢水发光温度也在 2000 左右。光谱实验中为得到吸收光谱就要用连续光谱照射样品。可用氙灯和氙灯做为连续光源。同步加速器的电子产生的连续光谱辐射，从可见光区伸展到短波紫外区。

**明线光谱** 原子所发射的线状光谱是在黑暗的背景上只有一些不连续的明线。明线光谱是气体或蒸气在高温下所发出的光生成的。例如把盐类的粉末放在煤气灯或酒精灯的火焰中，盐类就在高温下分解，把这种火焰发出的光射到分光镜上，除了火焰本身生成微弱的连续光谱以外，还有金属蒸发以后得到的炽热蒸气所生成的明线光谱。观察气体的光谱可以用光谱管。如图，它是一支中间比较细的封闭的玻璃管，里面装低压气体，管的两端有两个电极，把两个电极接到高压电源上，当两个电极通过稀薄气体放电时，气体就发出一定颜色的光，用分光镜可以看到它的明线光谱。

每种元素都有它自己特有的明线光谱，条数、位置各不相同，称作元素的标识谱线，通过这些谱线可以识别各种元素。

**吸收光谱** 处于基态和低激发态的原子或分子吸收具有连续分布的某些波长的光而跃迁到各激发态，形成了按波长排列的暗线或暗带组成的光谱。

吸收光谱是温度很高的光源发出来的白光，通过温度较低的蒸汽或气体后产生的。例如让高温光源发出的白光，通过温度较低的钠的蒸汽就能生成钠的吸收光谱。这个光谱背景是明亮的连续光谱。而在钠的标识谱线的位置上出现了暗线。通过大量实验观察总结出一条规律，即每一种元素的吸收光谱里暗线的位置跟它们明线光谱的位置是互相重合的。也就是每种元素所发射的光的频率跟它所吸收的光频率是相同的。

太阳光谱是一种吸收光谱，是因为太阳发出的光穿过温度比太阳本身低得多的太阳大气层，而在这大气层里存在着从太阳里蒸发出来的许多元素的气体，太阳光穿过它们的时候跟这些元素的标识谱线相同的光都被这些气体吸收掉了。因此我们看到的太阳光谱是在连续光谱的背景上分布着许多条暗线。这些暗线是德国物理学家夫琅和费首先发现的称为夫琅和费线。

**电磁波谱** 电磁波的整个频率（或波长）范围，又称频谱。电磁波包括的范围很广，从无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线，X 射线

到 射线都是电磁波。不同的电磁波产生的机理不同。无线电波是人工制造的，是振荡电路中自由电子的周期性的运动产生的。

红外线、可见光、紫外线；伦琴射线、 $\gamma$ 射线分别是原子的外层电子、内层电子和原子核受激发后产生的。人们把电磁波按着频率或波长大小的顺序排列成图表称为电磁波谱。在电磁波谱中各种电磁波由于频率或波长不同而表现出不同的特征，如波长较长的无线电波很容易表现出干涉、衍射等现象，但对波长越来越短的可见光、紫外线、伦琴射线、 $\gamma$ 射线要观察到它们的干涉衍射现象就越来越困难。但是从电磁波谱中看到各种电磁波的范围已经衔接起来，并且发生了交错，因此它们本质上相同，服从共同的规律，如波的频率  $f$ 、波长  $\lambda$  与波速  $v$  之间有  $v = \lambda f$ ，所有电磁波都以光速  $c = 3 \times 10^8$  米/秒的速度传播，因而对电磁波有  $c = \lambda f$ 。频率高的电磁波的波长短，反之频率低的波长就长。

红外线 可见光红端与微波间的电磁波，其波长范围约在  $7 \times 10^{-7}$  米  $\sim 1 \times 10^{-3}$  米之间。1800 年英国物理学家谢赫耳将温度计放在日光光谱的红光区域外侧，发现仍然具有很强的热作用。于是把这种看不见的射线称为红外射线。一切物体都在向外辐射红外线。物体温度越高发射的红外线波段越宽。红外线产生的机理是原子的外层电子受到激发。红外线的最显著特点是其热作用，红外线的波长比红光长，因此衍射现象比较显著，容易穿过云雾烟尘不易被空气中的悬浮粒子吸收。

利用红外线的热作用来加热物体，如烘干油漆和谷物以及进行医疗等，利用对红外线敏感的底片可以进行远距离摄影和高空摄影，从卫星上用红外线对地面摄影可以清晰地看出地面上的物体并且不受白天和黑夜的限制。由于一切物体都在不停地向外辐射红外线，并且不同的物体辐射的红外线的波长和强度不同，因此应用红外线遥感技术可以在飞机或卫星上勘测地热寻找水源、气象预报等。在现代战争中利用红外夜视仪等夜视设备使对方目标历历在目。利用红外物理可以探测高温物体的红外辐射。现在红外传感器还用作反导弹的预警等。

紫外线 波长在可见光紫端到 X 射线间的电磁辐射，其波长范围 400  $\sim$  500 纳米之间，不能引起人们的视觉。1801 年德国物理学家里特发现在日光光谱的紫端外侧一段能够使含有溴化银的照相底片感光，因而发现了紫外线的存在。

自然界的主要紫外线光源是太阳。太阳光透过大气层时波长短于  $290 \times 10^{-9}$  米的紫外线为大气层中的臭氧吸收掉。人工的紫外线光源有多种气体的电弧（如低压汞弧、高压汞弧），紫外线有化学作用能使照相底片感光，荧光作用强，日光灯、各种荧光灯和农业上用来诱杀害虫的黑光灯都是用紫外线激发荧光物质发光的。紫外线还有生理作用，能杀菌、消毒、治疗皮肤病和软骨病等。紫外线的粒子性较强，能使各种金属产生光电效应。

X 射线 1895 年德国物理学家伦琴发现高速度的电子流射到固体表面上，从这些固体表面就发出一种特殊的看不见的射线。开始不知其本质故称其为 X 射线。后来人们为了纪念伦琴，就把这种射线称为伦琴射线。

X 射线大约波长是  $10^{-5} \sim 10^3$  埃的电磁辐射。形成的机理是原子的内层电子受到激发后产生的。在电磁波谱中 X 射线的长波端与紫外线谱的

短波端重叠，短波端与 射线谱重叠。由于伦琴射线不受电场或磁场的作用而偏转。因此可以断定它不是由带电质点形成的。

伦琴射线有极强的穿透能力，它能穿透许多对可见光不透明的物质，在医学上用它来检查病变和骨折的情况，在工业上用它来检查金属铸造品内部有否存在气泡以及其它不正常的情况。利用波长已知的伦琴射线在晶体上的衍射，可以研究这个晶体的结构。因为许多晶体的晶格常数与 X 射线的波长是同数量级，因此晶体很适合用以观察伦琴射线衍射。伦琴射线衍射是研究晶体微观结构和缺陷的重要实验方法。

**伦琴射线管** 产生伦琴射线的装置。如图管内抽成高真空，里面封闭着两个极。K 是射线管的阴极，它由螺旋钨丝制成（由外加电源加热），钨丝对面一极装有重金属（铂钨）靶，它就是伦琴射线管的阳极，把管的两极接到几万伏高压电源上，使管内产生强电场，炽热钨丝发出的电子受电场的作用，就以很高的速度射到阳极金属靶上，于是就有伦琴射线从靶面发射出来透到管外。

**伦琴**(1845.3.27 ~ 1923.2.10) 德国实验物理学家。生于德国的伦内普。伦琴一生在物理学许多领域中进行过实验研究工作。他的最大成就是发现并深入研究了伦琴射线。1895 年 11 月在研究阴极射线时他发现射线管附近的一个涂有铂氰化钡的荧光屏发出闪烁的微光。他一连几个星期工作在实验室里进行许多实验，以确定这种“放射作用”的各种性质。12 月 28 日《维尔茨堡物理学医学学会会刊》发表了他关于这一发现的第一篇报告。在报告中他将这种新射线命名为“X 射线”。后人为纪念他而改名为伦琴射线，伦琴射线一般是指原子的内层电子受到激发后产生的一种波长很短的电磁辐射，其波长大致介于紫外线和 射线之间。

X 射线发现后导致一系列的重大发现。例如天然放射现象。人们把 X 射线的发现、电子的发现、放射性现象的发现称之为世纪之交的三大发现。这三大发现的根本意义在于引起物理学的彻底革命，导致现代物理学的诞生。为了表彰伦琴发现 X 射线的杰出贡献，瑞典皇家科学院于 1901 年 12 月将首次颁发的诺贝尔物理学奖授给了伦琴。

**光的干涉** 两束或两束以上的光波相遇时，在其相遇的区域里，光强分布产生稳定的强弱相间的现象。若在光波重叠的区域里放置一个观察屏，就能在屏上看到明暗相间的干涉图样。光的干涉现象表明光具有波动性。相遇的两束光必须满足一定条件才能产生干涉现象，这些条件称做相干条件。相干条件是： 频率相同； 相位相同或相位差恒定；

振动方向相同； 振幅相差不大。前两个条件保证了干涉条纹的稳定，后两个条件使条纹清晰。满足相干条件的光束称做相干光。能发出相干光的光源称做相干光源。普通光源（如白炽灯、蜡烛、太阳）发出的光不是相干光，必须用特殊的装置将一束光分成两束（或多束）再使它们相遇，才能产生干涉。菲涅耳双镜、杨氏双缝就都是这样的装置。肥皂膜和雨后马路上油层的彩色都是常见的光的干涉现象。激光器发出的激光，具有很好的相干性。利用激光光源，可以很方便地观察到光的干涉现象。

光的干涉现象在实际中有着广泛的应用。人们以光的干涉原理为基础，设计和制造了各种干涉仪和干涉装置，用以进行各种精密量度。例如用薄膜干涉原理可检测平面和曲面的光洁程度，其精度可达 1/120 微

米；可测量薄膜厚度和细丝的直径等。而各种干涉仪则可以进行大到天体直径，小到物质内部结构及光波波长等特殊量的精密测量。激光的出现，提供了高亮度、相干性好的单色光源，就更使这些测量提高到一个新的水平。干涉度量学就是专门研究这些问题的学科。

**牛顿环** 一种光的干涉图样。是牛顿在 1675 年首先观察到的。将一块曲率半径较大的平凸透镜放在一块玻璃平板上，用单色光照射透镜与玻璃板，就可以观察到一些明暗相间的同心圆环。圆环分布是中间疏、边缘密，圆心在接触点 O。从反射光看到的牛顿环中心是暗的，从透射光看到的牛顿环中心是明的。若用白光入射，将观察到彩色圆环。牛顿环是典型的等厚薄膜干涉。平凸透镜的凸球面和玻璃平板之间形成一个厚度均匀变化的圆尖劈形空气薄膜，当平行光垂直射向平凸透镜时，从尖劈形空气膜上、下表面反射的两束光相互叠加而产生干涉。同一半径的圆环处空气膜厚度相同，上、下表面反射光程差相同。因此使干涉图样呈圆环状。这种由同一厚度薄膜产生同一干涉条纹的干涉称作等厚干涉。

牛顿环装置常用来检验光学元件表面的准确度。如果改变凸透镜和平板玻璃间的压力，能使其间空气薄膜的厚度发生微小变化，条纹就会移动。用此原理可以精密地测定压力或长度的微小变化。

牛顿环是牛顿首先观察到的，但是由于牛顿持光的粒子说，他并不认为牛顿环是干涉的结果，他用微粒说解释了他的观测结果，但很不令人满意。直到 19 世纪初才由英国科学家杨氏用光的波动理论解释了牛顿环。

**薄膜干涉** 由薄膜上、下表面反射（或折射）光束相遇而产生的干涉。薄膜通常由厚度很小的透明介质形成。如肥皂泡膜、水面上的油膜、两片玻璃间所夹的空气膜、照相机镜头上所镀的介质膜等。比较简单的薄膜干涉有两种，一种称做等厚干涉，这是由平行光入射到厚度变化均匀、折射率均匀的薄膜上、下表面而形成的干涉条纹。薄膜厚度相同的地方形成同一条干涉条纹，故称等厚干涉。牛顿环和楔形平板干涉都属等厚干涉。另一种称做等倾干涉。当不同倾角的光入射到折射率均匀，上、下表面平行的薄膜上时，同一倾角的光经上、下表面反射（或折射）后相遇形成同一条干涉条纹，不同的干涉明纹或暗纹对应不同的倾角，这种干涉称做等倾干涉。等倾干涉一般采用扩展光源，并通过透镜观察。

把两块干净的玻璃片紧紧压叠，两玻璃片间的空气层就形成薄膜。用水银灯或钠灯作为光源，就可以观察到薄膜干涉现象。如果玻璃内表面不很平，所夹空气层厚度不均匀，观察到的将是一些不规则的等厚干涉条纹，通常是一些不规则的同心环。若用很平的玻璃片（如显微镜的承物片）则会出现一些平行条纹。手指用力压紧玻璃片时，空气膜厚度变化，条纹也随之改变。根据这个道理，可以测定平面的平直度。测定的精度很高，甚至几分之一波长那么小的隆起或下陷都可以从条纹的弯曲上检测出来。若使两个很平的玻璃板间有一个很小的角度，就构成一个楔形空气薄膜，用已知波长的单色光入射产生的干涉条纹，可用来测量很小的长度。计算公式为  $d = \frac{\lambda}{2n} \cdot L$ ，式中 d 是被测的长度，L 为劈

尖长度， $\lambda$  为光在真空中的波长，n 是劈尖介质的折射率（空气劈尖折射

率可取 1)， $l$  为相邻明纹（或暗纹）间的距离。

**杨氏实验** 是英国科学家托马斯·杨于 1801 年所做 (a) 双缝干涉 (b) 双缝干涉条纹的双光干涉实验。有双孔和双缝两种。杨氏双孔实验如图所示。由光源发出的光先通过一个小孔  $S$ ，再通过另一个不透明屏  $A$  上的两个相同的小孔  $S_1$  和  $S_2$  变成两束光，这两束光因为来自同一光源，因而是相干光，在它们重叠的区域里就会产生干涉。若在它们相遇的区域里放一个观察屏  $P$ ，就可以看到明暗相间的直条纹组。杨氏实验中相邻

两亮条纹的间隔  $y = \frac{D\lambda}{d}$ 。式中  $D$  为  $A$ 、 $B$  两屏间的距离， $d$  为  $S_1S_2$  间的距离， $\lambda$  是所用光波的波长。杨氏就用这个式子计算过光波的波长值。

杨氏实验是确立光的波动说的关键性实验，具有重要的历史意义，而且杨氏实验设备简单，现象明了，故经常被用来说明光的干涉概念。如果用激光光源，将激光束互接投射到双孔上，在屏幕上就可得到一组非常清晰的干涉条纹。

**光的衍射** 光在传播过程中绕过障碍物而偏离直线传播的现象。光的衍射也是光具有波动性的有力证明。

让点光源照射在一个可以改变大小的小圆孔上，当圆孔较大时，在孔后的屏上可以看到一个与圆孔一样大的光斑，这说明光是沿直线传播的。若逐渐将孔缩小，当孔的直径小到与光波的波长相当时，在屏上就出现了面积比圆孔大得多的衍射图样。这是一些以中心亮斑为圆心的、明暗相间的同心圆环。如果点光源为白光，则屏上出现彩色圆环。衍射图样的出现说明这时光已不再沿直线传播，而是绕到了孔的外面。这种衍射叫圆孔衍射，如果用线光源照在狭缝上，可以观察到中间为亮条，两边为明暗相间，逐渐变暗的条纹组。这种衍射叫单缝衍射。日常生活中也很容易观察到衍射现象。如通过手指间的细缝，或眯着眼看灯丝，隔着纱手帕看光源时，都可以看到衍射图样。光波的波长越长，障碍物尺寸越小，衍射现象越显著。日晕和月晕是光线通过悬浮在高空的微粒时所产生的衍射现象。

干涉和衍射都是波叠加的结果，其图样也相似，都是光具有波动性的有力证明。

**光栅** 也称衍射光栅。是利用多缝衍射原理使光发生色散（分解为光谱）的光学元件。它是一块刻有大量平行等宽、等距狭缝（刻线）的平面玻璃或金属片。光栅的狭缝数量很大，一般每毫米几十至几千条。单色平行光通过光栅每个缝的衍射和各缝间的干涉，形成暗条纹很宽、明条纹很细的图样，这些锐细而明亮的明条纹称做谱线。谱线的位置随波长而异，当复色光通过光栅后，不同波长的谱线在不同的位置出现而形成光谱。光通过光栅形成光谱是单缝衍射和多缝干涉的共同结果。

衍射光栅产生的光谱线的位置，可用式  $d \cdot \sin \theta = k \lambda$  表示。式中  $d = a + b$  为狭缝宽度  $a$  + 狭缝间距  $b$ ，称作光栅常数； $\theta$  为衍射角， $\lambda$  是波长， $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  是光谱级数。用此式可以计算光波波长。光栅产生的条纹具有强度大、条纹窄、彼此间隔宽的特点，有极好的分辨性能。因此利用光栅衍射可以精确地测定波长。衍射光栅的分辨本领  $R = \frac{\lambda}{\Delta \lambda} = kN$ 。其中  $N$  为狭缝数，狭缝数越多明条纹越亮、越细，光栅分辨本领就越高。增大缝数  $N$  提高分辨本领是光栅技术中的重要课题。

最早的光栅是 1821 年由德国科学客 J. 夫琅和费用细金属丝密排地绕在两平行细螺丝上制成的。因形如栅栏，故名为“光栅”。现代光栅是用精密的刻划机在玻璃或金属片上刻划而成的。光栅是光栅摄谱仪的核心组成部分，其种类很多。按所用光是透射还是反射分为透射光栅、反射光栅。反射光栅使用较为广泛；按其形状又分为平面光栅和凹面光栅。此外还有全息光栅、正交光栅、相平面衍射光栅截面示意图[实际装置中， $f$  比  $(a+b)$  大得多]光栅、炫耀光栅、阶梯光栅等。

**菲涅耳** 菲涅耳从 1814 年开始对光学的研究，在短暂的一生中，他在光学领域作出了卓越贡献，被誉为“物理光学的缔造者”。他先后设计和完成了许多实验，深入研究了光的干涉和衍射现象。他设计的菲涅耳双面镜和菲涅耳双棱镜实验，充分证实了干涉现象的存在。他还通过实验计算出红光的波长。菲涅耳用物理光学的干涉原理改造了惠更斯从纯几何角度提出的波前概念，充实和发展了惠更斯原理。经发展后的惠更斯原理被称为惠更斯-菲涅耳原理，是现在物理光学的基本原理。从这一原理出发，菲涅耳成功地解释了光的直线传播现象和光通过小圆孔、圆屏、直边、狭缝时的衍射现象，说明了光波波长极短对这些现象的意义。在通过实验研究衍射现象时，还用数学方法计算出圆孔衍射的条纹分布，提出了菲涅耳半波带法，解决了许多复杂的计算问题。他证实了光是横波，发现了圆偏振光和椭圆偏振光，建立了晶体光学的基础。由于菲涅耳的突出贡献，1818 年他获得了法国科学院举办的关于光的衍射现象最佳科研成果竞赛的优胜奖。1823 年他被选为法国科学院院士。1825 年被选为英国皇家学会会员。1827 年 7 月 14 日病逝。

**光电效应** 金属及其化合物在辐照下发射电子的现象。1887 年德国物理学家赫兹首先发现用紫外线照射金属时能使金属发射带电粒子。在汤姆孙发现电子以后勒纳于 1900 年通过对带电粒子的荷质比的测定，证明金属所发射的是电子。

人们用如图所示装置研究了光电效应。图中 S 为一个抽成真空的玻璃容器，阴极 K 为一块金属或金属氧化物平板，A 为阳极，C 为一石英小窗。G 是检流计，E 是电池组。当极板 K 受到一定强度的单色光照射时，检流计显示有电流通过。可是用光照阳极 A 时却没有电流通过，说明光照射金属板时，使某些电子从金属表面逸出，这些由于光照从金属表面逸出的电子叫光电子。光电子的定向运动所形成的电流叫光电流。

**光电效应规律** 总结实验结果得出光电效应的特点。

1. 饱和光电流和入射光的强度成正比。以一定强度的光照射阴极 K 时，光电流随两极间的电势差的大小而变化，其光电流  $I$  随两极间的电势差  $U$  变化的曲线如图，BC 段表明光电流  $I$  随电势差  $U$  增大而增大，CE 段表明当  $U$  增大到某一数值时，因阴极 K 上释放出的电子全部飞到阳极 A 上，光电流达到饱和值不再增加。此时的光电流  $I_H$  叫做饱和光电流，此曲线叫做光电效应的伏-安特性曲线。实验的结果是：两极的电势差不变时，增大光的强度光电流也随着增大。饱和光电流值也增大说明从电极 K 逸出的电子总数增加，并可定量证明饱和光电流和入射光的强度成正比。光电效应的伏安特性曲线

2. 光电子的最大初动能和入射光频率有关而与入射光强度无关。当电势差  $U$  为负值时，即将阴极 K 与电源正极相连，阳极 A 与电源负极相

连，此时光电流并不降为零。若增大此负电压就可达到一个使光电流降为零的电压值  $U_0$ ，这个  $U_0$  叫阻挡电压，由功能原理可得到

$e|U_0| = \frac{1}{2}mv_m^2$ ，式中  $e$  表示电子的电量，测出  $|U_0|$  值后计算出光电子

的最大初动能，实验结果是改变入射光的强度，不能改变光电子的最大初动能，光电子的最大初动能随着光的频率的增大而增大。

3. 光电效应的瞬时性，从实验知道产生光电流的过程非常快，一般不超过  $10^{-9}$  秒。停止用光照射，光电流也立即停止。

4. 光电效应发生的条件决定于入射光的频率，实验表明对于任何一种金属，入射光的频率必须大于某一极限频率才能产生光电效应，低于这个极限频率的光无论强度如何，照射时间多久也不能产生光电效应。这个极限频率  $\nu_0$  叫做截止频率或称为红限。如金属钠的  $\nu_0$  为  $4.39 \times 10^{14}$  Hz，铂的  $\nu_0$  为  $1.529 \times 10^{15}$  Hz 等。

**光电效应方程** 爱因斯坦建立的用以描述光电效应中光子和光电子能量相互关系的方程。他认为物质的原子和分子所发射的光不是连续的，只能一份一份地进行，每一份光叫做一个光子。光子的能量具有确定的值，其大小等于  $h\nu$ 。式中  $h$  为普朗克常数， $\nu$  是光的频率，光的频率越高光子的能量越大。

光电效应是由于金属中的自由电子吸收了光子的能量从金属中逸出而发生的。一个光子的能量一次就被金属中的一个电子全部吸收，不需累积能量的时间，因此光电效应具有瞬时性。光子的能量被电子吸收后，一部分消耗于这个光电子从金属表面逸出时所需要的逸出功  $A$ ，另一部

分转换为电子的初动能  $\frac{1}{2}mv^2$ ，根据能量守恒  $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$ ，此式叫

做爱因斯坦光电效应方程。它说明光子的能量  $h\nu$  必须大于  $A$  才能使电子逸出并获得初动能，光电效应才能发生，所以能够产生光电效应的入射光具有一定的极限频率，对一定频率的光，光子数目越多光的强度越大。所以光的强度只表明光子数目的多少。光强再大若没有足够高的频率，仍然不足以产生光电效应。在能够产生光电效应时光强增大才能使逸出的光电子增多，光电流的饱和值增大。

光电效应的应用利用光电效应可以制成各种光电转换器件，最简单的为真空光电管。图中  $K$  为涂有碱金属的阴极， $A$  为阳极，用光照射  $K$ ，电路里产生电流，电流的强度取决于入射光的强度，为了增加光电管的灵敏度，可以在玻璃泡中充入某种低压惰性气体，制成充气光电管。这种光电管中的光电子在飞向阳极的过程中与气体分子碰撞，使气体电离从而增大了光电流。用光电管制成的光控继电器用于自动控制，另外在放映电影时利用光电转换来实现声音的重放等。

当半导体受到光辐照时，自由载流子（自由电子与空穴）增多，电导变大，这种光电效应称为内光电效应，利用内光电效应可以制成光敏电阻，也可以制成光电池。在新兴的光纤通信技术中，光电管也是不可缺少的器件。

**爱因斯坦** (1879.3.14 ~ 1955.4.18) 20 世纪最伟大的自然科学家、物理学革命的旗手。爱因斯坦在物理学的许多领域中都有重大贡献，他的主要成就是 1905 年提出了光量子理论，该理论假设，光的能量在空

间中不是连续分布，导出了光子能量和频率的关系。认为光束能量的传播吸收产生过程中都具有量子性。从而圆满地解释了光电效应，首次揭示了微观客体最本质的特征是波粒二象性。爱因斯坦因此获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。1905 年解决液体中悬浮粒子运动的理论问题，提出测定分子真实大小的新方法。这一理论 3 年后为实验所证实，平息了历时半个世纪的关于原子存在的激烈争论。1905 年创建狭义相对论，该理论揭示了空间和时间、物质和运动的统一性。建立了一个既适用于宏观、低速，又适用于微观、高速的运动理论，并由此发现质量和能量的相当性，为原子能的利用奠定了理论基础。1906 年爱因斯坦把量子概念推广到物体内部振动自由度，解释低温条件下固体的比热容同温度的关系。1906 年提出受激辐射理论为 60 年代出现的激光技术准备了理论基础。1915 年建立了广义相对论。这也是物理学划时代的贡献。该理论进一步揭示了四维空间同物质的关系。指出空间时间不可能离开物质而独立存在，他还提出了广义相对论的实验验证。如水星轨道的近日点进动、光线在引力场中的偏折、引力红移等。1916 年爱因斯坦预言了引力波的存在。1919 年日全蚀时英国天文学家观察到了星光经过太阳附近发生的偏折，从而证实了广义相对论的预言。在广义相对论建立后，爱因斯坦又着手建立统一场论，要把当时已知的电磁相互作用和引力相互作用统一为一种相互作用，他虽然没有获得成功，但为物理学未来的发展提供了一个大有希望的前景。

**普朗克**(1858.4.23 ~ 1947.10.4) 近代德国物理学家、量子论的奠基人。他的主要成就是：1900 年为了克服经典物理学在解释黑体辐射现象时所存在的困难，提出了量子假说。所谓“黑体”是指能全部吸收外来电磁辐射的理想物体，黑体在发射电磁辐射的能力方面也比同温度下任何其他物体要强。量子假说提出：振子能量永远为  $h\nu$  整数倍，其中  $\nu$  为辐射频率， $h$  为新的物理恒量，被后人通称为普朗克恒量。他还从理论上进行了论证提出了辐射系统一线性振子—辐射场之间能量不连续的量子交换的概念。1906 年他又证明了普朗克恒量作为作用量子的重要意义，从而建立了量子论的基础。量子论的诞生是科学发展史上的一个重大事件。爱因斯坦接收并补充了这一理论，以此丰富和发展了自己的相对论。丹麦物理学家玻尔也曾使用这一理论来解释一些原子结构的辐射现象，建立了原子结构的玻尔模型。普朗克的基本量子理论第一次把能量的不连续性引入人对自然过程的更进一步的认识，给科学提供了一把钥匙，用它可以打开原子内部宇宙的大门。普朗克的这一发现获得了 1918 年的诺贝尔物理学奖金。他的这些发现是在极其困难的条件下研究出来的。当时他的家庭相继发生了许多不幸事件，他的妻子、儿子和女儿相继去世，但这些不幸遭遇和打击并没有动摇普朗克献身于科学的决心，他用加倍努力工作来抑制自己感情的悲痛，为科学立下了奇功。1918 年被选为英国皇家学会会员。1930 ~ 1937 年他担任德皇威廉大帝科学研究会会长，这是当时德国最高的学术职位之一。1944 年普朗克在柏林的住宅遭空袭时他的手稿和藏书以及他同许多科学家的往来信件同时被毁，这是科学界的重大损失。1947 年 10 月 4 日在格丁根逝世。

**激光** 基于受激辐射放大原理而产生的一种相干光。设某粒子（原子、分子或离子等）系统的一对能级中，低能级  $E_1$ ，高能级  $E_2$ ，若入射

光子的能量  $h\nu = E_2 - E_1$ 。  $\nu$  为入射光子的频率，则光子与粒子的相互作用有三种性质不同的基本过程。自发辐射，受激辐射和吸收过程。当原子不受外界影响，处于高能级的电子会自发地跳向低能级，即电子从高能级向低能级跃迁，同时放出光子，其能量  $h\nu = E_2 - E_1$ 。这种发光过程叫自发辐射。由于光源中的发光物质包含大量的原子，因此自发辐射发出的光彼此独立。当原子中处于高能级  $E_2$  上的电子在能量为  $h\nu = E_2 - E_1$  的光子的激发下跃迁到低能级  $E_1$  而发光，这种发光叫受激辐射。受激辐射产生的光子与外来光子的频率、相位、振动方向和传播方向完全相同。当一个光子激发得到另一个相同的光子时，如果这两个光子再引起其他原子产生受激辐射，又能得到特征完全相同的更多光子，这个现象叫光的放大，这就是激光形成的原理。如果能量为  $h\nu = E_2 - E_1$  的光子与处于低能级  $E_1$  的原子接近时，光子就可能被原子所吸收而使从低能级  $E_1$  激发到高能级  $E_2$  上去，这就是光的吸收。光的吸收使光子数减少。为了使入射光得到净放大，需使受激辐射超过吸收作用，就要实现粒子数反转，即使处在高能级上的原子数比处在低能级上的原子数多，因此产生激光必须选择能实现粒子数反转的物质，这种物质的原子能级除低能级的基态、高能级的激发态，还存在高能级的亚稳态能级，粒子处在亚稳态能级的时间较长。如果外界强光不断激励使亚稳态  $E_2$  上的粒子不断累积，于是在亚稳态与基态之间形成了粒子数反转，为了使受激辐射加强抑制自发辐射，激光器中有光学谐振腔，因此激光器都有三个基本组成部分：工作物质，它是激光器的核心，激励系统，它将外界能量转换成激光光能，光学共振腔形成光振荡并放出激光。

**激光的应用** 激光具有一系列与普通光不同的优异特性。1. 高亮度性：太阳表面的亮度已经很高，发光亮度的数量级为  $10^3$ 。但激光器的输出亮度为  $10^{10} \sim 10^{17}$  数量级，这种亮度意味着能量的高度集中。2. 高方向性：激光光束的发散角只有探照灯的  $1/1000$ 。3. 高单色性：由激光器发射出的激光辐射能量，通常只集中在十分窄的频率范围内，因此具有很高的单色性，单色光是一把光学尺子，用氦氖激光器测量数十米的长度，其误差仅在  $10^{-7}$  米以内。4. 高相干性：普通光源的发光过程是自发辐射发出的光不是相干光，激光器的发光过程是受激辐射发出的光子，振动频率、方向、位相都相同，由于激光的特点因此被广泛地应用。

在工业方面由于激光的高亮度、高方向性，因此可在透镜焦点附近产生几千度、几万度的高温，因此在打孔、焊接、切割划片等方面均有应用，并可用激光进行精密测量。在农业上用激光选择培育良种，研究病虫害的发生发展规律和防治方法。在医学领域一种新型的以激光为基础的医疗和诊断手段得到迅速发展，激光治疗的方式包括辐照、烧灼、汽化、焊接、光刀切割以及光针灸等。激光通信是把声音、图象或其他信息调制到激光载波上发送出去。激光通信的优点是传送信息容量大、通信距离远、保密性高以及抗干扰性强。激光通信可分为地面大气通信、宇宙空间通信和光学纤维通信等几大类，激光投射跟踪系统是激光在军事上的重要应用，利用这一系统可以使激光导向炸弹准确击中目标，当载有激光导向的飞机飞临目标时，飞行员发现目标只需按一下电钮，这时经过适当扩束的激光就立刻投向目标，其反射光马上被飞机上的光电

设备接收到。利用激光器可以实现自动瞄准，从而使飞机扔出去的激光导向炸弹根据探测到的反射光调整方向使炸弹朝激光束所指的方向飞去。

**光的微粒说** 关于光的本性的一种早期学说。在 17 世纪末期，牛顿提出了光的微粒学说，他认为光是一种具有完全弹性的球形微粒，大量地聚集组成的。这些微粒以高速度作直线运动，并且只有在媒质发生变更时才会有速度的变化，速度的变化则用媒质对微粒的作用力来解释，牛顿从这种论据出发说明了光的直进现象、反射定律和折射定律。然而微粒说无法解释一束光射到两种媒质分界面处会同时发生反射和折射以及几束光交叉相遇时会毫无妨碍地互相穿过等现象。但由于牛顿在学术界有很高的声望致使微粒说在 100 多年的长时间里一直占着主导地位，直到 19 世纪初人们观察了光的干涉、衍射等现象，并测定了光速从而说明了牛顿微粒说是不正确的。在这里应说明牛顿的微粒和近代的“光的两重性学说”中的微粒有着本质区别。

**光的波动说** 关于光的本性的一种早期学说。荷兰物理学家惠更斯创立了波动说。他在 1690 年于《光论》一书中写道“光同声一样是以球形波面传播的”。并且指出光振动所达到的每一点都可视为次波的振动中心。次波的包络面为传播着的波的波阵面（波前）。惠更斯的学说说明了光在相同媒质或不同某质中的传播的方向问题以及与此相关的反射和折射定律。但没有对光的波长、周期性等与波动有密切联系的概念加以解释，直到 19 世纪初惠更斯的原理得到了补充。1801 年英国物理学家托马斯·杨巧妙而简单地解决了相干光源的问题。成功地观察到了光的干涉现象，为波动说取得公认和迅速发展奠定了基础。德国工程师菲涅耳以杨氏干涉原理补充了惠更斯原理，由此形成了惠更斯-菲涅耳原理。用它可圆满地解释光的干涉和衍射现象，也能解释光的直线传播。在进一步的研究中观察到了光的偏振和偏振光的干涉。19 世纪中叶光速的测定证明，光密媒质中的光速小于光疏媒质中的光速，进一步证实波动说的正确。19 世纪 60 年代麦克斯韦的光的电磁理论使光的波动说发展到一个新的阶段。

在此处应清楚平常两只电灯的光相遇看不见干涉现象不是因为光的频率太高，干涉图样太细小看不清楚，而是因为两只电灯属非相干光源。还应分辨马路上汽油膜呈现彩色；把两块平板玻璃板用手紧紧地捏在一起，会从玻璃板上看见彩色条纹的属于干涉现象，而从平行于日光灯狭缝看日光灯会看到平行于日光灯的彩色条纹主要是衍射现象。而雨后天空有美丽的长虹是由于色散。

**光的电磁理论** 说明光在本质上是电磁波的理论。是英国物理学家麦克斯韦提出的。

惠更斯的波动说揭露了光的波动性，成功地解释了光的干涉、衍射和偏振等许多光的现象，可是解释光是什么样的波动过程问题时，却错误地认为光是某种弹性媒质中传播的机械波，但光的速度极大而且在真空中也能传播，因此使波动说遇到困难。

19 世纪 60 年代麦克斯韦在研究电磁场理论时预言，电磁场向外传播形成电磁波，电磁波是横波，其传播速度和光速相同。并且推导出介质

折射率  $n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu}$ 。其中  $c$  为光在真空中的速度， $v$  为光在介电常数为

磁导率为  $\mu$  的介质中的速度。麦克斯韦认为光是一种波长很短的电磁波而不是在弹性介质中传播的机械波。1888 年赫兹用实验证实了电磁波的存在，后来人们又作了许多实验证明电磁波和光波一样也能产生干涉、衍射和偏振等现象。这相当于从实验上证明了电磁波的存在。光的电磁说虽然取得了很大成功，但仍然只是部分地反映了物质世界的客观实际。

**光子说** 1905 年为解释光电效应爱因斯坦提出的假设。按着经典的电磁理论光波的能量是连续的，因此光电子获得的能量的大小应该与光的强度、光照的时间的长短有关而与光的频率无关，但这与实验事实相反。为此爱因斯坦推广了普朗克关于黑体辐射的量子理论，提出了光的量子论。他认为光束是一粒一粒的光子组成，每个光子具有能量  $h\nu$ ，当频率一定时光子愈多光强越大。在真空中有恒定的传播速度即光速  $c$ ，根据爱因斯坦的狭义相对论光子的静止质量为零，所以静止的光子是不存在的，其动量  $p = mc = \frac{h\nu}{c}$ ， $p = \frac{h}{\lambda}$ 。  $\lambda$  为光波的波长， $h$  为普朗克常数。

光子具有能量、动量和质量，说明光子本身就是一种物质。但是光子在真空或空气中永远以光速  $c$  运动着，不能处于静止状态。

**光的波粒二象性** 指光具有波动和微粒的二重性质。光的干涉、衍射等现象和光的电磁波理论证实了光具有波动性，而光电效应、康普顿效应等证实了光具有粒子性。因此光具有波粒二象性。在爱因斯坦的光的假设中已初步引用了这种统一的概念，光子能量的公式  $E=h\nu$ ，动量的公式  $p = \frac{h}{\lambda}$ 。  $\nu$ 、 $\lambda$  分别代表光的频率和波长，表明光子的能量和动量

已经通过普朗克常数与描述光波的物理量  $\nu$ 、 $\lambda$  联系在一起，由此可见光既是粒子又是波。二象性是光的客观属性。事实上光波不是通常所理解的连续的波动（经典电磁波理论）而是类似于波的规律，表明大量光子运动规律的一种几率波，实验结果是在光的实验中如果照射光的强度很大，照相底片上立即出现干涉图样，如果减弱光流使光子一个一个地通过狭缝，照相底片上只出现了一些无规则分布的点子，表现出光的粒子性，单个粒子的运动无一定的轨道，如果曝光时间长照相底片上又出现干涉图象。在强光的照射下曝光时间短形成的干涉图象中某些地方光波的强度大，表明这些地方到达的光子稠密些，在弱光的照射下曝光时间长形成的干涉图象中某些地方光波的强度大，表明这些地方到达的光子频繁，因此干涉图象中某点光波强度的大小跟光子到达该点的几率成正比。一般说来大量光子产生的效果往往显示出波动性，个别光子产生的效果往往显示出粒子性，在电磁波谱中无线电波的频率低，“光子”的能量很低，波长较长，因此容易观察到波动性，但随着频率的增高能量增大波长减少波动性越来越不显著，粒子性越来越明显了。

由此可见，大量光子产生的效果往往显示出波动性，个别光子产生的效果往往显示出粒子性。光在传播过程中往往显示出波动性，而在与物质相互作用时往往显示出粒子性。但这不意味着在显示出一种属性

时，另一种属性没有了。事实上当人们观察光电效应时光子的角分布与入射光的偏振方向是有关的。光的这种微观粒子性和波动性与宏观世界里的粒子和波动有质的区别。因此人们不能用简单的图象来表示光的二象性。但是可以建立起一套理论，同时概括光的电磁理论和光的量子理论，这个理论叫量子电动力学。

**原子** 构成元素的最小单元。是物质结构的一个层次。原子一词来自希腊文，“意思是不可分割的”。公元前 4 世纪，古希腊物理学家德谟克利特提出这一概念，并把它当作物质的最小单元，但是差不多同时代的亚里士多德等人却反对这种物质的原子观，他们认为物质是连续的，这种观点在中世纪占优势，但随着科学的进步和实验技术的发展，物质的原子观在 16 世纪之后又为人们所接受，著名学者伽利略、笛卡儿、牛顿等人都支持这种观点。著名的俄国化学家门捷列夫所发现的周期律指出各种化学元素的原子间相互关联的性质是建立原子结构理论时的一个指导原则。从近代物理观点看，原子只不过是物质结构的一个层次，这个层次介于分子和原子核之间。汤姆生的原子模型英国物理学家 J.J. 汤姆生于 1907 年提出的一种原子模型。汤姆生在发现电子之后，对原子中正、负电荷如何分布的问题提出了他自己的原子模型，汤姆生认为：原子中的正、负电荷均匀地分布在原子球体内，而正电荷则嵌在其中，所以有人将汤姆生模型类比为“西瓜模型”。为了解释元素周期表，汤姆生还假设电子分布在一个个环上，第一只环只可放 5 个电子，第二只环上放 10 个电子，假如一个原子有 70 个电子，那么必须有 6 只同心环。汤姆生模型虽然能够解释元素的周期性，但以后的实验证明，此模型是错误的，不过它包含的同心环以及环上只能安置有限个电子的概念有益于后来的玻尔理论的发展。

**$\alpha$  粒子散射实验** 1909 年英国物理学家卢瑟福及其助手所做的用  $\alpha$  粒子轰击金属箔的实验，是原子物理早期的实验之一。 $\alpha$  粒子实际上是氦核，带两个正电荷，用镭作为放射源放出  $\alpha$  射线去轰击靶原子时，与靶原子发生相互作用并引起可以观察到的散射现象。实验安排由镭 C 放出  $\alpha$  粒子，经过小孔准直形成一束狭窄的均匀的  $\alpha$  射线射向金属箔， $\alpha$  粒子将受到金属箔中的原子的不同影响沿着不同的方向散射，通过置于金属箔后面可旋转荧光屏和放大镜可观察到散射的  $\alpha$  粒子轰击荧光屏时产生的闪光，并把单位时间内在某一方向上（角）散射的  $\alpha$  粒子记录下来，研究  $\alpha$  束经金属箔散射后，按不同的散射角分布的情况。盖革和马斯敦在 1909 年按上述实验，观察到大多数  $\alpha$  粒子经过金箔散射后偏转角度不大，但有少数  $\alpha$  粒子的偏转角度却很大，约有 1/8000 的  $\alpha$  粒子的散射角度超过  $90^\circ$ ，有的几乎达  $180^\circ$ ，按照汤姆生模型的假设，正电荷均匀分布在原子球体中，带电粒子打进球心时，它受到的库仑力与球的半径  $r$  成正比，越往中心受到的力越小，故较易穿过球心，按汤姆生的模型作理论计算表明： $\alpha$  粒子要产生大于  $90^\circ$  的偏转的几率是  $10^{-3500}$ ，这是一个无穷小量，而盖革和马斯敦得到的实验值为 1/8000，由此判断汤姆生模型是错误的。

**原子的核式结构** 又称行星模型，或卢瑟福模型。由卢瑟福于 1911 年在  $\alpha$  粒子散射实验的基础上提出来的。

根据  $\alpha$  粒子的库仑散射实验，卢瑟福认为：原子内部的正电荷联系

着大的质量而集中在很小的中心体积内（就是原子核），而负电荷则分布在与原子大小同数量级的封闭轨道上并绕着核旋转，对于中性原子，所有电子所带的负电荷之和等于原子中心的正电荷。原子的核式结构及  $\alpha$  粒子散射的情形如图所示。严谨的理论推导可得  $\alpha$  粒子的散射服从公式

$$b = \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2}$$

式中， $b$  是  $\alpha$  粒子的瞄准距离， $a$  是散射因子， $a = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{E}$ ， $Z_1$ 、 $Z_2$  分别是带电粒子和原子的正电荷数， $E$  是带电粒子的能量，此式能很好地解  $\alpha$  粒子的大角度散射，当  $\alpha$  粒子的能量  $E = 768 \text{ MeV}$ ， $b = 10^{-12} \text{ cm}$ ，一个  $\alpha$  粒子被金原子核的散射角度为  $112^\circ$ 。在实验上测量瞄准距离是不可能的，卢瑟福经过严谨的推导得到著名的卢瑟福公式

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{a}{2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

式中  $\sigma(\theta)$  是散射截面，即  $\alpha$  粒子散射到  $\theta \sim d$  之间时，在  $d$  立体角之内每个原子的有效散射截面。用卢瑟福公式计算  $N$  个  $\alpha$  粒子打在金箔上时，在  $d$  立体角内测到的  $\alpha$  粒子的数目被盖革与马斯敦在 1913 年用  $\alpha$  粒子散射实验测量的数据所证实。由卢瑟福公式还可知道原子核的半径在  $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ cm}$  量级。

**玻尔的原子理论** 丹麦物理学家玻尔于 1913 年提出的关于原子结构的初步理论。

卢瑟福模型与经典电动力学相矛盾，因为绕原子核运动的电子有加速度，它会自动辐射能量，使电子的能量愈来愈小，这样会使电子逐渐接近原子核，最后与核相撞，其次按经典电动力学理论，电子放出辐射时其频率等于电子围绕核运动的频率，由于电子能量逐渐减少，故辐射的频率也逐渐改变，所以原子发射的光谱应是连续谱，但事实上，原子是十分稳定的，并且原子光谱是不连续的线光谱，这说明由宏观现象总结的经典理论不能应用于原子内的微观过程，玻尔将普朗克的量子论推广到原子内，玻尔假设：

原子只能存在一些不连续的稳定状态，这些不稳定的状态各有一定的能量  $E_1$ 、 $E_2$ ……。绕原子核作圆周运动（经典轨道）的电子只能处于一些分立的轨道上，它只在轨道上绕核转动而不产生电磁辐射，一切能量的改变，是由于吸收或放出辐射或因碰撞的结果，只能从一个稳定态过渡到另一个稳定态的跃迁来产生，不能任意连续改变。

当一个电子从一个定态轨道跃迁到另一定态轨道时，会以电磁波的形式放出（或吸收）能量  $h\nu$ ，其值由下式决定

$$h\nu = E_n - E_m$$

式中  $h$  是普朗克常数， $\nu$  是电磁波的频率， $E_m$  和  $E_n$  是两个定态轨道的能级。

原子的不同能量状态和电子沿不同的圆形轨道绕核运动相对应，原子各定态的能量是不连续的，只有满足下列条件的轨道才是可能的轨道，即轨道半径  $r$  与电子动量  $p$  的乘积等于  $h/2\pi$  的整数倍：

$$pr = nh/2 \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

式中  $n$  是正整数，叫做量子数。

**原子的半径** 我们可以作一个简单的估算，1 摩尔的原子数目是阿伏伽罗常数  $N_A$ ，设若原子的半径为  $r$ ，原子为球体，则体积为  $\frac{4}{3}\pi r^3$ ，1 摩尔原子的某物质的原子量为  $A$ ，其密度为  $\rho$ ，那么 1 摩尔原子的某物质的总体积为  $A/\rho$ ，而 1 摩尔原子的总体积又可表示为  $\frac{4}{3}\pi r^3 N_A$ ，故有：

$$\frac{4}{3}\pi r^3 N_A = \frac{A}{\rho}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3A}{4\pi\rho N_A}}$$

由上式可计算各元素的原子半径，几种元素的原子半径见表 1。

表 1 几种原子的半径

元素	质量数 $A$ (克)	密度 (克 / $\text{cm}^3$ )	原子半径 $r(A)$
Li	7	0.534	1.52
Al	27	2.7	1.43
Cu	63.5	8.96	1.28
S	32	2.07	1.88
Pb	207.2	11.34	1.75

其中  $1\text{\AA}$  (埃) =  $10^{-8}\text{cm}$ 。从上表看出，不同原子的半径都差不多，这是经典物理无法回答的。

**原子的定态 基态 激发态** 原子和原子核等微观粒子体系所可能具有的各种稳定状态叫定态。稳定状态是指微观粒子体系在没有外界作用时的状态和能量不随时间而变的状态。处于定态的微观粒子具有确定的能量。微观粒子在其最低能量轨道上运行时称为基态，又称正常态，也就是说原子在未接受能量时的原有正常状态。要严格回答不同状态的能量数值必须依靠量子力学计算才能知道原子的基态。不过用洪特定则和朗德间隔定则也能确定某种原子的基态，例如氧的基态为  $3P_2$ ，

氢的基态为  $2S_{\frac{1}{2}}$ ，而氦的基态为  $1S$  等。微观粒子受到撞击、照射和其

它的扰动或激动而吸收能量，内部一个或几个轨道电子跃迁到一较高能量状态时，称为激发态或受激态，也即原子所具有的能量高于基态者，称为激发态。

**原子的能级** 原子中的电子只能处于一系列不连续的分立的定态，这些定态分别具有一定的能量。在氢原子中，电子在各定态上的能量（包括动能和势能）为

$$E_n = -\frac{2\pi^2 Z^2 e^4 m_e}{h^2 n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中  $Z$  是核电荷数，对氢  $Z=1$ ， $e$  和  $m_e$  分别是电子的电量和质量， $h$  是普

朗克常数，以电子被电离时的电势能为零，故氢原子的能量取负值，上式中  $n$  取每一个正数，则对应一个能级， $n$  是量子数， $n$  愈大，能级愈密。在正常状态下，原子处于基态，即  $n=1, 2, 3, 4, \dots$  时称为激发态。将电子从基态激发到脱离原子叫做电离（ $n \rightarrow \infty$ ），此时所需的能量叫做电离势能，例如氢原子中基态的能量为  $-13.6\text{eV}$ ，使电子电离的电离势能即是  $13.6\text{eV}$ 。

**量子数** 表征微观粒子运动状态的一些特定数定。量子化的概念最初是由普朗克引入的，即电磁辐射的能量和物体吸收的辐射能量只能是量子化的，是某一最小能量值  $\epsilon_0$  的整数倍，这个整数  $n$  称为量子数。事实上不仅原子的能量还有它的动量、电子的运行轨道、电子的自旋方向都是量子化的，即是说电子的动量、运动轨道的分布和自旋方向都是不连续的，此外我们将看到不伦电子还有其它基本粒子的能量、运动轨道分布、磁矩等都是量子化的。

**电子云** 描述原子或分子中电子的概率密度在核外空间中分布的图象。原子由原子核和核外壳层电子组成，原子的质量集中于原子核的极小体积中，我们知道原子的半径为  $10^{-8}\text{cm}$  数量级，而原子核半径为  $10^{-13}\text{cm}$  数量级，因此原子的壳层电子可在一个相当广阔的空间绕核运动，原子核带有  $Z$  个正电荷，那么有  $Z$  个电子绕核运动，形成电子云，从量子力学观点看，由玻尔或索末菲用旧量子论假设的壳层电子运行的经典轨道只不过是电子在这些地方出现的几率较大而已，因此电子云是一种几率云，它们“模糊”地笼罩在原子核周围并“被弥散”在整个原子空间，成为云状。在电子的振动图案中，对应于一种振动的能量空间的每一点上的几率密度，代表电子在该点的或然率，在距离原子很远的地方，几率密度为零，这意味着非常不可能在那里找到电子，在非常邻近核的区域，电子出现的几率也为零，则说明电子无法到达此区域。

**原子光谱** 原子或离子的运动状态发生变化时，发射或吸收的有特定频率的电磁波谱。原子光谱的覆盖范围很宽，从射频段一直延伸到 X 射线频段。通常，原子光谱是指红外、可见、紫外区域的谱。

原子光谱中某一谱线的产生是与原子中电子在某一对特定能级之间的跃迁相联系的。因此，用原子光谱可以研究原子结构。由于原子是组成物质的基本单位，原子光谱对于研究分子结构、固体结构等也是很重要的。另一方面，由于原子光谱可以了解原子的运动状态，从而可以研究包含原子在内的若干物理过程。原子光谱技术广泛应用于化学、天体物理学、等离子物理学和一些应用技术科学中。

**特征光谱** 电子在能级之间跃迁时所发射的光谱。由于原子存在一系列的分立能级，电子从较高激发态跃迁到较低激发态或基态时，就发射出一定频率的光，若能级  $E_1$  大于能级  $E_2$ ，电子从  $E_1$  跃迁到  $E_2$  时发光的频率为：

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

因特征光谱中每条谱线都对应某一对分立能级之间的跃迁，所以每条谱线都有确定的波长，因此特征谱线是一系列分立的亮线。若壳层电子在壳层之间跃迁，则发射特征 X 射线，特征 X 射线是叠加在连续谱上的尖峰。

**光谱线系** 原子光谱并非无规则地分布，而是按一定的规律组成若干线系，这些线系的规律性与原子内部电子的分布情况及运动规律有密切联系，每一线系体现了电子在能级之间跃迁的规律性，例如我们将要在氢原子光谱中介绍的赖曼系、巴尔末系、帕邢系，碱金属光谱中的主线系、第一辅线系和第二辅线系。

**氢光谱的规律** 构成氢原子光谱的若干个线系的规律。1885年瑞士物理学家、中学教师巴尔末发现氢原子光谱中可见光部分谱线的波长之间的关系可用下面的简单公式表示：

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

其中B为常数， $B = 3645.6 \text{ \AA}$ ，n为整数，当n=3, 4, 5, 6时，上式分别给出氢光谱中可见部分的4条谱线的波长，这4条谱线分别用H<sub>4</sub>、H<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>、H<sub>1</sub>来标志，这个公式称为巴尔末公式，若不用波长而用波数来表示，则可把巴尔末公式写成下列更简单的形式，

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) (n = 3, 4, 5, 6, \dots)$$

式中 $R = 4/B$ ，称为黎德堡常数， $R = 109677.58 \text{ cm}^{-1}$ ，黎德堡提出一个更普遍的方程

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = T(m) - T(n)$$

氢原子的所有谱线都可以用黎德堡方程表示，式中 $m=1, 2, 3, \dots$ ，对应每一个m有 $n=m+1, m+2, m+3, \dots$ ，构成一个谱线系（如图）。式中，当 $m=1, n=2, 3, 4, 5, \dots$ 时，此谱线系处于紫外区，1914年由赖曼发现，称为赖曼线系。当 $m=2, n=3, 4, 5, 6, \dots$ ，谱线在可见区，称为巴尔末系，其中有最有名的红色H<sub>1</sub>（ $n=3$ ，

$= 6563 \text{ \AA}$ ）是埃格斯特朗在1853年首先测到的，波长单位 $\text{\AA}$ （埃）即是用他的名字命名的。

当 $m=3, n=4, 5, 6, 7, \dots$ 的氢光谱线系在红外区域内，1908年由帕邢发现，称为帕邢系。当 $m=4, n=5, 6, 7, 8, \dots$ 组成的线系在红外区域，1922年由布喇开发现，称为布喇开系。当 $m=5, n=6, 7, 8, 9, \dots$ 的氢光谱线在红外线区域，1924年由普芳德发现，称为普芳德系。当 $m=6, n=7$ 的谱线后来由哈泼雷斯发现。

**类氢离子** 原子核外只有一个电子的离子，这类离子与氢原子类似，叫类氢离子。但原子核带 $Z > 1$ 的正电荷，例如 $\text{He}^+$ 带一个正电荷（记为 $\text{He}^+$ ）， $\text{Li}^{2+}$ 带两个正电荷（记为 $\text{Li}^{2+}$ ）， $\text{Be}^{3+}$ （记为 $\text{Be}^{3+}$ ），利用加速器或在高温等离子体中，可得到 $\text{O}^{7+}$ 、 $\text{Cl}^{16+}$ 、 $\text{Fe}^{25+}$ 、 $\text{Ni}^{27+}$ 等高Z类氢离子。类氢离子的光谱特征与氢原子光谱类似。

**离子** 原子是由原子核和核外电子组成，原子核带正电荷，绕核运动的电子带负电荷，原子的核电荷数与核外壳层电子数相等，因此原子显电中性。如果原子从外获得的能量超过某个壳层电子的结合能，那么这个电子就可脱离原子核的引力场范围成为自由电子。当原子失去一个或多个电子时，核电荷数多于核外壳层电子数，这时原子就变成带正电

荷的离子，同样某些元素的原子能粘上一个电子，使得核外壳层电子总数大于核电荷数，此时原子变成带负电荷的负离子。在多数情形下，原子失去电子变成正离子，在绝对温度不为零的任何气体中都有一定数量的原子被电离，在气体放电过程中以及受控聚变装置产生的高温等离子体中，有大量的工作气体原子和杂质原子的壳层电子被剥离成为离子，例如氧原子，若失去一个电子记作  $O^+$ ，若失去两电子记作  $O^{2+}$  以此类推。此外以离子键组的化合物，如可溶于水的酸、碱、盐，在它们的水溶液中存在着大量的正负离子。

**等离子体** 由离子、电子以及未电离的中性粒子的集合组成，整体呈中性的物质状态。

普通气体温度升高时，气体粒子的热运动加剧，使粒子之间发生强烈碰撞，大量原子或分子中的电子被撞掉，当温度高达百万开到 1 亿开，所有气体原子全部电离。电离出的自由电子总的负电量与正离子总的正电量相等。这种高度电离的、宏观上呈中性的气性叫等离子体。

等离子体和普通气体性质不同。普通气体由分子构成，分子之间相互作用力是短程力，仅当分子碰撞时，分子之间的相互作用力才有明显效果，理论上用分子运动论描述。在等离子体中，带电粒子之间的库仑力是长程力，库仑力的作用效果远远超过带电粒子可能发生的局部短程碰撞效果。等离子体中的带电粒子运动时，能引起正电荷或负电荷局部集中，产生电场；电荷定向运动引起电流，产生磁场。电场和磁场要影响其它带电粒子的运动，并伴随着极强的热辐射和热传导；等离子体能被磁场约束作回旋运动等。等离子体的这些特性使它区别于普通气体被称为物质的第四态。

在宇宙中，等离子体是物质最主要的正常状态。宇宙研究，宇宙开发，以及卫星、宇航、能源等新技术将随着等离子体的研究而进入新时代。

**辐射 自激辐射 受激辐射** 物体释放出某一频率或频带的电磁波叫辐射。辐射是自然界中物质之间交换能量的形式之一。如热辐射，光辐射。

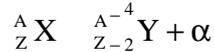
处于激发态的原子中，电子在激发态能级上只能停留很短时间（约  $10^{-8}$  秒），它们会自发地回到较低的激发态或基态上而辐射出光子，这种辐射叫做自激辐射，原子发生自激辐射时，各个原子发射的光子向四面八方传播，且各个原子所处的激发态是不相同，而跃迁回到的低激发态也不相同，所以各受激原子辐射的光子的频率（能量）不相同，辐射光波的初位相（初始时刻）不同，光波振动的方向（偏振）也不同，因此这些光在叠加时不会产生稳定的干涉条纹，日光、烛光、普通电光源发射的线光谱和带光谱都属于自激辐射。

当原子处于激发态能级  $E_2$  时，如果有能量  $h\nu = E_2 - E_1$  ( $E_2 > E_1$ ) 的光子照射在此原子上，在入射光子的影响下，原子会发出一个同样的光子而跃迁到低能级  $E_1$  上，这种辐射叫做受激辐射。原子在发生受激辐射时，辐射光子的频率、发射方向、初位相和偏振方向都与入射光子完全相同，即是说受激辐射的光子与入射的光子没有区别，这样由一个入射光子引起的受激辐射就得到两个同样的光子，如果在媒质中传播这些光子再引起其它原子的受激辐射，就会产生越来越多的相同光子，使得这种单色



存在有 60 余种天然放射性核素，原子序数排在 82 (即 Z=82) 以后的元素都是不稳定的。更多的放射性元素通过人工制造产生，一般是在反应堆和加速器中靠核反应和活化等方法产生的。

、 、 衰变 放射性元素放出 粒子的衰变叫做 衰变。原子核的 衰变可以一般地表示为：



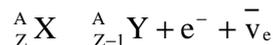
发生 衰变的必要条件是：衰变前母核的原子量必须大于衰变后子核的原子量和氦核的原子量的总和。 衰变比较集中于重核。

衰变能可表示为：

$$E = (m_x - m_y - m_\alpha) c^2$$

式中  $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m$  分别表示母核、子核和 粒子的静止质量， $c$  为真空中的光速。

只是核电荷改变而核子数 (质量数) 并不改变的核衰变叫 衰变。它主要包括  $\beta^-$  衰变 (放出电子)， $\beta^+$  衰变 (放出正电子) 和轨道电子捕获 (EC) 三种形式。经理论和实验证明： $\beta^-$  衰变过程中伴随着中微子释放，中微子是一种不带电荷，静止质量接近于零，记作  $\bar{\nu}_e$ 。 $\beta^-$  衰变一般可表示为：

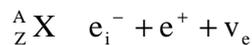


在衰变中释放的是正电子和中微子叫  $\beta^+$  衰变。表示为：



衰变过程中，若母核俘获一个核外轨道电子，使母核中一个质子转为中子，叫轨道电子捕获。

由于 K 层电子最靠近原子核，所以 K 电子俘获最易发生。电子俘获可表示为：



$i$  表示从  $i$  层俘获电子。 衰变的衰变能分别表示为：

$$E^- = (m_x - m_y) c^2$$

$$E^+ = (m_x - m_y - 2m_e) c^2$$

$$E_{EC} = (m_x - m_y) c^2 - W_i$$

式中  $m_x$  和  $m_y$  为母核原子和子核原子的静止质量， $m_e$  为电子的静止质量， $c$  为真空中的光速， $W_i$  为轨道电子结合能。

原子核在发生  $\beta^-$  和  $\beta^+$  衰变时，子核往往处于激发态，而处于激发态的原子核是不稳定的，它向低激发态和基态跃迁时往往释放出光子，称为  $\gamma$  衰变，如果用  $E_n$  和  $E_l$  分别表示原子核上、下两个激发态的能级，则 光子的能量为：

$$E_\gamma = E_n - E_l$$

这里忽略原子核因释放 光子引起的反冲能量。

在某些情况下，原子核从高激发态向低激发态或基态跃迁时，不放出  $\gamma$  光子，而是把这部分能量直接交给核外电子，使原子内的某个壳层电子被电离，这种现象称为内转换 (IC)，释放的电子称为内转换电子，

内转换电子的能量为  $E_e$  :

$$E_e = E_n - E_1 - W_i$$

$W_i$  是  $i$  层电子的结合能, 表示某个  $i$  层电子经内转换被电离。  $\gamma$  光子和内转换电子的能量是分立的非连续谱。它与  $\alpha$  衰变电子的连续谱截然不同。原子核能级发生跃迁时, 究竟是放出  $\gamma$  光子的几率大, 还是产生内转换的几率大, 完全由核能级的特性决定。

$\alpha$  粒子、  $\beta$  粒子、  $\gamma$  光子  $\alpha$  粒子实际上是氦核, 它由两个质子和两个中子组成, 它的质量等于氦原子量减去两个电子的质量, 因为没有壳层电子, 所以带两个正电荷即  $+2e$ ,  $\alpha$  粒子的能量约在 4~9 兆电子伏特之间, 它有很强的电离作用, 它的贯穿能力很弱, 一般说一张薄纸足以阻挡  $\alpha$  粒子穿过,  $\beta$  粒子在通过物质时因电离逐渐失去能量, 速度愈小时, 电离作用愈强, 最后  $\beta$  粒子从外界得到两个电子变成氦原子。

$\beta$  粒子有两种即电子和正电子,  $\beta^-$  衰变放出电子, 而  $\beta^+$  衰变则放出正电子,  $\beta$  粒子的静止质量很小, 带有一个电荷 (负电荷, 或正电荷), 因此在磁场中会发生偏转。  $\beta$  粒子的贯穿本领较强, 因它是带电粒子故穿透物质时有较强电离作用。

光子既是粒也是一种电磁波, 光子没有静止质量, 也不带电荷, 故在磁场中不发生偏转。事实上光学范围内的 (红外光、可见光、紫外光) 光子与 (软、硬) X 光子及  $\gamma$  光子并无本质上的差别, 它们只不过是频率不同的电磁波, 在产生的机制上有所区别, 光学范围内的光子是原子外层电子在能级之间跃迁所致, 特征 X 射线是电子在原子的壳层电子的层间跃迁所致, X 光子也可由高能电子的韧致辐射或回旋辐射产生, 而  $\gamma$  光子则是原子核从高激发态跃迁到低激发或基态时所产生的电磁辐射。

$\alpha$  射线、  $\beta$  射线、  $\gamma$  射线  $\alpha$  射线由  $\alpha$  粒子构成,  $\alpha$  射线的能谱是分立谱,  $\beta$  射线包括若干群能量不同的  $\beta$  粒子。因为  $\beta$  粒子带有  $+2e$  电荷, 故在磁场中将发生偏转, 因为  $\beta$  射粒子有很强的电离作用, 通常用云室探测  $\beta$  粒的“径迹”, 因为  $\beta$  粒子带电, 可用闪烁体对  $\beta$  射线的强弱计数。利用  $\beta$  射线中不同速度的  $\beta$  粒子在均匀磁场中发生的偏转角度不同的现象, 可用磁摄谱仪测量  $\beta$  射线的能谱。

$\beta$  射线由电子或正电子组成, 所以  $\beta$  射线实际上是电子或正电子流。因此,  $\beta$  射线在磁场中将发生偏转, 故可用  $\beta$  射线在磁场中的偏转角度确定  $\beta$  粒子的能谱和速度,  $\beta$  射线有较强的穿透能力, 它通过物质时可能产生弹性散身, 这种散射既可以由物质原子的外层电子所引起, 也可以由原子核所引起。  $\beta$  射线使物质电离而引起能量损失,  $\beta$  射线中的电子 (或正电子) 经过原子核场时受到减速作用而发生韧致辐射辐射出 X 光。  $\beta$  射线的能谱是连续谱。

$\gamma$  射线由  $\gamma$  光子组成,  $\gamma$  射线在磁场中不发生偏转, 它有很强的穿透能力, 其穿透深度取决于  $\gamma$  光子的能量和被穿透物质的原子序数,  $\gamma$  射线的电离本领很弱, 它经过某种物质时可产生光电效应 ( $\gamma$  光子被物质的原子吸收放出一个光电子), 康普顿散射 ( $\gamma$  光子被原子的壳层电子所散射), 正负电子对 ( $\gamma$  光子的能量转变成一对正负电子及电子的动能),  $\gamma$  射线通过物质时由于上述三种效应而强度减弱。

$\gamma$  射线的能谱是分立谱, 受激原子核释放的  $\gamma$  光子都有确定的能

量。

**衰变** 原子核由于放出某种粒子而变为新核的现象。原子核是一个量子体系，核衰变是原子核自发产生的变化，它是一个量子跃迁过程，它服从量子统计规律。对任何一个放射性核素，它发生衰变的精确时刻是不能预知的，但作为一个整体，衰变的规律十分明确。若在  $dt$  时间间隔内发生核衰变的数目为  $dN$ ，它必定正比于当时存在的原子核数目  $N$ ，显然也正比于时间间隔  $dt$ ，于是有：

$$-dN = \lambda N dt$$

$\lambda$  是比例常数， $dN$  代表  $N$  的减少量，故为负值。设初始时刻  $t=0$  时，原子核的数目为  $N_0$ ，则上式经积分后变为：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

这是放射性衰变服从的指数定律。

**蜕变 嬗变** 原子核自发地放射一个  $\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子转变成另一个核的过程叫做蜕变。

放射性蜕变过程必须遵守电荷守恒定律、质量和能量不灭定律，即子核的电荷数与放出射线的电荷数之和应等于母核的电荷数。由于质量能量不灭，所以要求： $m_{母} = m_{子} + m_{射线} + \frac{W}{c^2}$ ， $W$  为衰变时释放的能量， $m_{射线}$  前加  $\frac{W}{c^2}$  是因为有时衰变不止放出一种射线。因为天然放射性现象中与  $W$  相对应的质量不仅为原子质量很小的部分，所以子核质量数与射线质量数之和应等于母核质量数。

天然放射性蜕变有四系，即：铀系以铀的同位素  $^{238}_{92}\text{U}$  开始，最后的稳定产物是  $^{206}_{82}\text{Pb}$ ；钍系以  $^{232}_{90}\text{Th}$  开始，最后稳定的产物是  $^{208}_{82}\text{Pb}$ ；锕系以  $^{235}_{92}\text{U}$  开始，最后稳定的产物是  $^{207}_{82}\text{Pb}$ ；镎系以  $^{241}_{94}\text{Pu}$  开始，最后生成物是稳定的  $^{209}_{83}\text{Bi}$  前三个系是天然放射系，它们的最后稳定产物是铅的同位素。

用加速器加速的高能粒子轰击某些物质或用核辐照的方法产生的放射性同位素而放出  $\alpha$  射线  $\beta$  射线称为嬗变或人工蜕变。

**衰变常数** 原子核在单位时间内发生衰变的几率。在指数衰变律公式（见“衰变”）中，可写为：

$$\lambda = -\frac{dN/dt}{N}$$

分子代表单位时间内发生衰变的原子核数，分母代表当时的原子核总数， $\lambda$  称为衰变常数。每一个放射性元素都有它特有的  $\lambda$  值，没有任何两种放射性元素的衰变常数  $\lambda$  是相同的，由此可用测衰变常数  $\lambda$  的方法判断发生衰变的元素属于哪一种元素。大的放射性元素其衰变速率也大。

**半衰期** 放射性元素的原子核衰变掉仅有核数一半所需的时间，用  $T_{1/2}$  表示，当  $t=T_{1/2}$  时， $N=N_0/2$ ，于是有：

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

$T_{1/2}$  与  $\lambda$  一样是放射性元素的特征常数， $\lambda$  越大  $T_{1/2}$  越小。

**平均寿命** 处于某一状态(能态)的放射性原子核平均生存的时间。放射性元素中每个核发生衰变的时间有长有短，我们用平均寿命表示发生衰变的原子核的寿命。现在已知的可以衰变的基本粒子，其平均寿命分布在很大的范围内。中子的平均寿命最长，为  $898 \pm 16$  秒，其它粒子平均寿命都短于  $10^{-5}$  秒，最短约为  $10^{-25}$  秒。

**核反应** 一般是由一定能量的粒子(轻核， $\alpha$ ， $\beta$ ，射线， $n$ ， $p$  等)轰击靶原子核而引起靶核性质的改变的过程。作为轰击粒子的能量可以很低(1eV)，也可以高到数百京电子伏特(1GeV=10<sup>9</sup>eV)，其入射粒子能量低于 100MeV 以下称为低能核反应，100MeV ~ 1GeV 称为中能核反应，1GeV 以上的称为高能核反应。作为靶核是多种多样的，从质子到铀核，历史上第一个人工核反应： $^{14}\text{N} + p + ^{17}\text{O}$  一般情形下，核反应的过程主要是复合核过程。入射的粒子打在靶核上，它们就混合在一起，形成复合核，此种复合核状态可以延续  $10^{-16}$  秒以上，随后它通过某种可能的蜕变方式释放出某种粒子而完成核反应。另一种是剥裂反应，例如  $^{27}\text{Al}(d, p)^{28}\text{Al}$ ，即用氘核轰击铝靶时，氘核擦过靶核时被剥裂，氘核中的中子进入靶核，而质子被抛出去。还有一种称为拾取过程的核反应，例如  $^{13}\text{C}(^3\text{He}, n)^{12}\text{C}$ ，入射的  $^3\text{He}$  擦过靶核时，从靶核中抓走一个中子，形成出射的  $n$  粒子。剥裂过程和拾取过程又称为直接过程，因为这两种过程在  $10^{-21}$  秒内完成，此时间约为入射粒子通过靶核所需的时间。

核反应过程中，除能量守恒和动量守恒外，还遵从电荷守恒、质量守恒、角动量守恒和宇称守恒。

**核力** 在原子核中，使质子与中子紧密地结合在一起的力。核力的特点是：**短程力**，核力只有在原子核的线度( $10^{-13}\text{cm}$ )内才发生作用。

**强相互作用**，质子间产生库仑斥力，而核力能抗拒库仑斥力而使质子紧密结合在一起，这说明核力很强，它比库仑力大 100 倍。核力与核电荷无关，质子间的核力  $F_{pp}$ ，中子间的核力  $F_{nn}$ ，及质子与中子间的核力  $F_{np}$  都相等，即： $F_{pp}=F_{nn}=F_{np}$ 。核子不能无限靠近，即核力除表现为引力之外，在某些情形下表现为斥力。大体上说核子间的距离在 0.8 ~ 2.0 费米(1 费米= $10^{-13}\text{cm}$ )之间表现为引力，小于 0.8 费米表现为斥力，大于 10 费米时，核力消失。核力也是一种交换力，核子之间通过交换介子( $\pi^+$ ， $\pi^-$ ， $\pi^0$ )而发生强相互作用，此类似于光子是电磁相互作用的传播者。

**质量亏损** 质子和中子的总质量与由它们组成的原子核的质量之差。实验指出，原子核的质量比核内所有质子和中子的质量总和总是少一些，这个差额便是原子核的质量亏损，一般以  $\Delta m$  表示。

按照爱因斯坦的相对论质能关系，系统的质量改变  $\Delta m$  时，一定伴有能量改变  $E = \Delta m c^2$ 。由此可知，当若干个质子和中子结合成核时，必有  $E$  的能量放出，并且  $E = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_x]c^2$ 。根据原子核的结合能的定义，上式计算出的  $E$  就是核的结合能。如果要使一个原子核分解为单个的质子和中子，就必须至少供给与结合能等值的能量。例如，氦核( $^4_2\text{He}$ )的质量  $m_x = 4.001506\text{u}$ ，一个质子的质量  $m_p = 1.00726\text{u}$ ，一个中子的质量  $m_n = 1.008665\text{u}$ 。两个中子和两个质子组合成一个氦核

时发生的质量亏损  $m = 2 \times 1.007276 + 2 \times 1.008665 - 4.001506 = 0.030376u$ ，从而氦核的结合能  $E = mc^2 = 0.030376 \times 1.6606 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 4.53992 \times 10^{-27} \text{焦} = 28.28 \text{兆电子伏特}$ 。所以，要使一个氦核分裂为单个的质子和中子，就至少需要 28.28 兆电子伏特的能量。所谓质量亏损并不是质量的消灭，核反应结果生成的辐射场是一种物质，它具有质量、动量和能量。核反应后生成的核的质量加上辐射场的质量，与反应前核的质量相等，即质量守恒。 $E = mc^2$  反映的是核反应前后核的质量变化（辐射场的质量）与释放能量（辐射场的能量）间的对应关系。

**质能方程** 物体总质量与其总能量之间的关系式。是爱因斯坦于 1905 年提出的狭义相对论的一个重要结论。其表示式为：

$$E = mc^2$$

$c$  是光速。由质能方程，基本粒子的静止质量既可用质量单位（千克）表示，也可用能量单位表示，例如一个电子的静止质量是  $9.108 \times 10^{-31}$  千克，也可以说电子的静止质量为  $0.51\text{MeV}$ ，质子的质量是  $1.673 \times 10^{-27}$  千克，也可说它的质量是  $938.3\text{MeV}$ ，它们通过质能方程而等同。质能方程说明质量和能量可以相互转换，一定质量的物质可以用能量表示，同样一定的能量也可有质量表示，使物质不灭定律和能量守恒定律联系起来，在核反应中，如果出现质量亏损，则必然有能量释放，释放的能量必定为： $E = mc^2$ 。

需说明的是：基本粒子用能量表示其质量是指它们的静止质量，如果粒子的运动速度接近光速变为相对论粒子时，它的质量则按相对论处理，即

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

**原子核的结合能** 核子结合成原子核或原子核分解为核子（质子和中子）时，释放或吸收的能量。如果原子核的质量为  $m$ ，那么该原子核的结合能  $B$  由下式确定。

$$m = Zm_p + Nm_n - B/c^2$$

式中  $m_p$ 、 $m_n$  是质子和中子质量， $Z$  和  $N$  分别是质子数和中子数，一般的核数据中给出原子量  $M$  故有：

$$M = Zm_p + Nm_n + E_e - B/c^2$$

$m_e$  是电子质量，某个原子核结合能一般表达式：

$$B = [Z(m_e + m_p) + Nm_n - M] c^2$$

原子核中每个核子对结合能的贡献用平均结合能或称为比结合能  $B/A$  表示， $A$  是核子的总数，中等核的平均结合能为  $8.6\text{MeV}$  左右，轻核和重核的结合能较小，见图。（横轴为  $A$ ，纵轴为  $B/A$ （ $\text{MeV}$  核子））

**原子能** 在核反应过程中，原子核结构发生变化释放出的能量。又称核能。20 世纪 30 年代末，科学家发现，用中子轰击铀原子核，一个入射中子能使一个铀核分裂成两块具有中等质量数的碎片，同时释放大量能量和两三个中子；这两三个中子又能引起其他铀核分裂，产生更多的中子，分裂更多的铀核。这样形成的自持链式反应，可在瞬间把铀核全部分裂，释放出巨额能量。铀 235 可以被任何能量的中子特别是运动速

度最慢的热中子分裂。铀 238 只能被运动速度很快的快中子分裂，对慢中子和热中子则只俘获不分裂。通常所说的核裂变，主要指铀 235 核分裂。一个铀 235 核分裂释放的核裂变为 2 亿电子伏特。这是原子核结构发生变化的一种方式，叫裂变反应。另外一种方式叫聚变反应。如一个氘核和一个氚核聚合成一个氦核释放出的核聚变能为 1760 万电子伏特。以相同质量的反应物的释能大小作比较，核裂变能和核聚变能分别是化学能的 250 万倍和 1000 万倍，1 千克铀 235 相当于 2500 吨煤，1 千克氘和氚相当于 1 万吨煤。

**裂变** 重核分裂成两个（偶尔也分裂成两个以上）中等质量的核的过程。某些重核如  $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{233}\text{U}$  等，在中子轰击下分裂成两个中等质量的核。以  $^{235}\text{U}$  为例，在慢中子轰击下，分裂成质量数  $M=95$  和  $M=139$  的两个碎块的可能性最大



裂变产生的碎块有多种组合方式，例如：



也是一种组合方式。 $^{239}\text{Pu}$  是人工元素，在慢中子轰击下产生裂变。 $^{238}\text{U}$  只有在快中子（动能大于 1MeV）才可诱发裂变。其它的粒子如质子、氘、粒子、光子也可诱发核裂变，但中子引起的裂变占有重要的地位。

**链式反应** 中子引起铀核裂变后放出的中子继续引起其它铀核裂变并持续不断进行下去的过程。实现链式反应的条件是：减少中子被  $^{238}\text{U}$  吸收的机会，使中子的增殖系数  $K > 1$ 。我们知道天然铀中 99.3% 是  $^{238}\text{U}$ ， $^{238}\text{U}$  俘获快中子后发生裂变的几率很小，而形成  $^{239}\text{U}$  的几率很大，慢中子（热中子）与  $^{235}\text{U}$  发生作用时，产生裂变的几率很大，它比热中子被  $^{238}\text{U}$  俘获放出射线的几率大 200 倍以上，因此有两种方法使  $K > 1$ ，即减少  $^{238}\text{U}$  的成分，使  $^{235}\text{U}$  浓缩；另一个方法是使裂变产生的中子（其能量峰值在 1MeV 附近）减速慢化，轻元素是最好的中子减速剂，通常用重水或石墨作为减速剂，减速后的热中子增加了与  $^{235}\text{U}$  发生裂变的几率，减少了被  $^{238}\text{U}$  吸收的可能性，有利于使  $K > 1$ 。铀块的体积足够大，减少热中子在发生裂变之前逃逸的可能性。增加反射层，也可阻止中子逃逸，保证  $K > 1$ 。

链式反应最根本的条件是使中子增殖系数  $K$  大于 1。

**临界体积** 能够发生链式反应的最小铀块体积。当铀块较小，中子从铀块中通过时还没有机会碰到一个铀核而发生核裂变之前就跑到铀块外面，如果仅有少数热中子与  $^{235}\text{U}$  发生裂变，而裂变产生的中子又多数逃逸到铀块外面，那么铀块中的中子会越来越来少，不能满足链式反应的条件  $K > 1$ ，于是裂变反应就不可继续下去。因此铀块的大小必有一个临界体积，此体积足以使铀块中的中子数有机会碰到  $^{235}\text{U}$  的核，保证中子增值系数  $K > 1$ 。

**原子的反应堆** 一种能控制的利用原子能的装置。如果裂变反应达到一定强度，控制中子倍增系数  $K=1$ ，那么裂变链式反应就能有控制地进行，不发生爆炸而输出能量。

原子反应堆的堆形由减速剂和热交换方式及用途有许多种，如石墨堆、重水堆、沸水堆、压水堆、高温气冷堆、增殖堆、高通量堆裂变-聚变混合堆等。以天然铀为燃料，石墨为减速剂的裂变堆的工作过程，见

图。一个天然的  $^{235}\text{U}$  原子核在中子轰击下裂变时平均放出  $\bar{\nu}$  个中子，这些快中子碰到  $^{238}\text{U}$  时又会引起裂变产生快中子的裂变因子为  $k$ ，使快中子增加到  $k\bar{\nu}$  个，其中  $k > 1$ 。进入慢化剂的  $k\bar{\nu}$  个快中子有  $k\bar{\nu}P$  个慢化为热中子，其中  $P$  为中子逃脱的共振吸收几率。在幸存的中子中仅有  $k\bar{\nu}Pf$  个中子被  $^{235}\text{U}$  所俘获， $f$  称为中子的利用系数，在  $k\bar{\nu}Pf$  个俘获的中子中产生裂变的份额是：

$$K = k\bar{\nu}Pf \frac{\sigma_f}{\sigma_t}$$

$K$  称为增殖系数， $\sigma_f$  是中子的裂变截面， $\sigma_t$  是可裂核的总截面。如果  $K > 1$ ，反应堆能连续工作。以天然铀为燃料，用石墨作慢化剂组成栅格，各典型系数值： $k = 2.47$ ， $\bar{\nu} = 1.02$ ， $p = 0.89$ ， $f = 0.88$ ， $\frac{\sigma_f}{\sigma_t} = 0.54$ ，

则  $K = 1.07$ ，满足链式反应的条件。

反应堆堆心部分用含铅水泥的厚混凝土屏蔽层屏蔽，四周及堆顶用高强度金属材料加固，防止放射性射线、核泄漏并确保反应堆的安全。为控制链式反应强度，用碳化硼或金属镉制成的控制棒插入堆心中。因为这两种物质能大量吸收中子，通过控制棒插入的深浅，可控制堆心中子数，或使反应堆停止工作。堆心外面是使堆心冷却的传热剂，把传热剂泵到热交换器中，使水变为高压水蒸汽，可推动汽轮机发电。

**原子弹** 利用快中子引发的快速的、不可控制的原子核裂变链式反应原理而设计制造的炸弹。原子弹的构造示意图如右图。图中将两块半球形的核燃料 ( $^{235}\text{U}$  或  $^{239}\text{Pu}$ ) 分开安装在炸弹中，每一块的体积都小于临界体积，其中一块固定，另一块后面装上普通炸药 (TNT) 和引爆装置 (雷管)。当引爆装置引起普通炸药爆炸时，产生的高温高压气体便把两块原子炸药迅速压在一起，使其成为一整块，超过临界体积，形成中子增殖系数  $K > 1$  的超临界状态，此时大量的核能便通过链式反应在极短的时间内放出，形成猛烈的爆炸。在军事上，原子弹主要有四种杀伤力：  
**光辐射。** 剧烈的核爆炸放出可见光和红外辐射。这种辐射以光速传播，弹着点周围的地区首先受到这种非常强烈的光辐射影响，足以灼伤离爆炸点相当远的地方的人员和引起大火。  
**冲击波。** 爆炸本身就是一种强大的压力波，与声波相似但要强烈得多。足以摧毁地面上的军事设施和建筑物，造成间接杀伤。  
**放射辐射。** 裂变产生大量的  $\gamma$  射线，大量的  $\gamma$  射线辐射造成人身受害。  
**放射性沾染。** 裂变碎片绝大部分是具有放射性的同位素，大约有 200 多种。另外，原子爆炸时放出的巨大数量的中子与爆炸点地面上和天空中的原子核作用，又会产生更多的放射性原子核，这些放射性原子核许多呈气态，其它一些是尘埃，它们随着大气环流传布到各地大气中或落在地面上形成放射性沾染。人们通过食、吸、接触等渠道被身体吸收，潜伏在身体的组织器官，不断放射各种射线使人身丧失各种能力而慢慢死亡。在和平建设中比普通炸药威力大千万倍的原子爆炸可广泛用于开山筑坝、改山治水、改造沙漠、融化两极厚冰等大规模的工程建设，造福于人类。

世界上第一颗原子弹是 1945 年 7 月 16 日美国新墨西哥州阿拉芒戈多附近的沙漠上空试验成功的。我国于 1964 年 10 月 16 日爆炸了第一颗

原子弹，从此打破了美、俄的核垄断。

**核燃料** 裂变物质中能产生链式反应的物质。如铀—235，钚—239 和铀—233，它们的核在中子轰击下产生裂变，同时放出 2~3 个中子，使裂变反应继续下去。天然核燃料只有铀—235，钚—239，铀—233 是人工制造的核燃料。铀和它的同位素在铀矿石中的含量很低，首先使铀元素从矿石中分离出来，然后根据不同的需要做成  $^{235}\text{U}$  含量（即浓缩度）不同的核燃料，原子弹中用纯  $^{235}\text{U}$ ，在某些反应堆中用浓缩铀（精料），而在另一些堆中可用不经浓缩的铀（粗料），通常把核燃料作成核元件（圆柱体）置入反应堆堆心。在某些情况下把核燃料做成盐的溶液。在原子能发电站中，使用的核燃料是浓缩度较低的固体核元件。

**聚变** 将两个较轻的核结合而形成一个较重的核和一个很轻的核（或粒子）的过程。两个较轻的核在融合过程中产生质量亏损而释放出巨大的能量，两个轻核在发生聚变时因它们都带正电荷而彼此排斥，然而两个能量足够高的核迎面相遇，它们就能相当紧密地聚集在一起，以致核力能够克服库仑斥力而发生核聚变。当一个核电荷数为  $Z_1$ ，核半径为  $R_1$  的核与另一个核电荷数为  $Z_2$  半径为  $R_2$  的核“接触”时，其库仑斥力产生的位能是：

$$(U_{\text{斥力}})_{\text{max}} = \frac{(Z_1 e)(Z_2 e)}{4\pi\epsilon_0(R_1 + R_2)}$$

对于氢的同位素  $Z_1=Z_2=1$ ， $R_1 \approx R_2 \approx 2 \times 10^{-15}\text{m}$ ， $\epsilon_0$  是真空介电常数，

$$(U_{\text{斥力}})_{\text{max}} \approx 360\text{keV}$$

即每个轻核需要 180keV 的动能。实际上，因为粒子有一定的势垒贯穿几率和粒子速度分布，使小部分粒子的动能远大于平均动能，因此聚变温度可降低。一些感兴趣的聚变反应是：

- (1)  $\text{D} + \text{D} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n} + 3.27\text{MeV}$
- (2)  $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} + \text{p} + 4.05\text{MeV}$
- (3)  $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + 17.58\text{MeV}$
- (4)  $\text{D} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + 18.34\text{MeV}$
- (5)  ${}^6\text{Li} + \text{n} \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4.8\text{MeV}$
- (6)  $\text{p} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + 4\text{MeV}$
- (7)  ${}^7\text{Li} + \text{n}(2.5\text{MeV}) \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + \text{n}$

其中 D 是氘，T 是氚，都是氢的同位素。P 表示质子，1 升海水中的氘经聚变反应后释放的能量与 300 升汽油所释放的能量相当。在 D-D 反应中，堆燃料的成本是微不足道的，氘在自然界中存在的比例是普通氢的 1/6500，氚是放射性物质，其半衰期为 12.4 年，它在自然界中无天然存在，必须由人工制造。

目前最有希望的聚变是(3)和(5) D-T 反应产生的中子与包层再生区的  ${}^6\text{Li}$  再次发生聚变反应除多获得 4.8MeV 的能量外，还可产生宝贵的氚，因而反应堆可以自己生产足够的氚，使堆能持续运行。

**受控热核反应** 用人为的方法控制的热核反应。它是目前各国科学家研究的前沿尖端课题。它比产生爆炸式的热核反应要复杂得多，困难得多。它必须具备下述一些条件：几千万度以上的高温。在这个温度下，等离子气体中的部分原子核可能进行聚变反应，温度越高，聚变反

应进行得越快。充分约束。即把高温下的等离子体约束在一定的区域内，并保持足够的时间，使其充分聚变。相当低的密度。高温下的等离子体具有很高的压强，因此要把容器内的气体抽到相当真空，使单位体积内的粒子数不能超过  $10^{15}$  个，相当于常温下气体密度的几分之一。保证自持。处于高温下的等离子体的不稳定性，使它只能被约束一个很短的时间。为了使足够数量的等离子体发生聚变反应，并得自持下去，就必须对参与反应时的等离子体的密度和实现对它可靠的约束时间之间有一个要求，即劳逊条件。这个条件单就时间而言，氘-氘反应至少为 10 秒，氘-氚反应仅需 0.1 秒。

尽管如此，由于受控热核反应的诱人前景，各国科学家们仍在坚持不懈地努力探索，改进装置。典型的有欧州的“托卡马克”（准稳态环磁场受控热核装置）。

**氢弹** 利用迅速而剧烈的、不可控制的热核反应而引起爆炸的装置。氢弹的构造示意图如下。容器中装有聚变氢弹的构造示意图物质，作为氢弹的燃料。一般氢弹的燃料主要是氘、氚和锂的凝聚态物质。

聚变反应方程为：



如果爆炸物中再掺以铀等裂变燃料，热核反应产生的中子又可引发铀核裂变，从而更增加了能量的释放。为了创造热核反应需要的高温，容器附近有两个相互分开的半球形铀（或钚）块，作为氢弹的引爆物（原子弹）。此外，还需用普通炸药(TNT)作为原子弹的引爆物。因此，一般认为，氢弹是用一颗小原子弹作引弹的，比原子弹更具威力。当雷管引发普通炸药(TNT)爆炸时，它产生的高温高压气体，将两半球的铀（或钚）块迅速压拢，使原子弹爆炸，同时立刻产生了氘与氚的聚变反应所需要的高温，因而热核反应迅速而剧烈地、不可控制地进行，形成了爆炸。人类第一个氢弹爆炸是 1954 年实现的。我国于 1967 年爆炸了第一颗氢弹，进一步打破了超级大国的核垄断。

**同位素** **放射性同位素** 具有相同质子数、不同中子数的原子。一般天然元素是几种同位素组成的混合物。某种同位素的原子数占此种元素总原子数的百分比叫该同位素的丰度。如天然氮气内含有  ${}^{14}\text{N}$  和  ${}^{15}\text{N}$  两种同位素，每 271 个氮原子中有 270  ${}^{14}\text{N}$  和 1 个  ${}^{15}\text{N}$ ，因而  ${}^{14}\text{N}$  的丰度为 99.63%， ${}^{15}\text{N}$  的丰度为 0.37%。化学原子量是该元素的天然组成中同位素质量的平均值。如镁含的三种同位素丰度分别为： ${}^{24}\text{Mg}$ 78.6%， ${}^{25}\text{Mg}$ 10.11%， ${}^{26}\text{Mg}$ 11.29%。

同位素中有一类能自发地放射出各种射线，称为放射性同位素，或放射性核素。放射性同位素有天然性和人工性两大类。天然性指天然存在的放射性同位素，有钍系、铀系、锕系，它们大多由重元素组成。人工性指用核反应的方法获得的放射性，最早是在 1934 年由约里奥-居里夫妇用  $\alpha$  粒子轰击铝时发现的。放射性同位素放射出的射线类型除  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  外，还有正电子、质子、中子、中微子等其它粒子。

放射性同位素具有放射性这一特征，以及放出射线能量所造成的各种生物效应使其在各方面的应用很广泛。如同位素示踪就是利用放射性核素或稀有稳定核素作为示踪剂，研究化学、生物或其它过程的方法。因为放射核素或稀有稳定核素的原子、分子及其化合物与普通物质的相

应原子、分子及其化合物具有相同的化学生物等性质，但放射性核素能不断地放射具有一定特色的射线，通过探测方法追踪含有放射性核素的标记，从而找到各种规律。同位素示踪在工业、医学、生命科学、农业等方面都有广泛应用。在农业上，利用射线的生物效应可以进行育种、灭虫、食品贮藏等。如射线对生物具有致死效应，在一定剂量的射线照射下，可杀死微生物、昆虫及高等生物体的细胞。利用这一特性可使鱼肉类食物延长贮藏期，可以杀灭谷物中的害虫，可以抑制薯类、水果等发芽或延期成熟。目前市场上的部分食品就是经过射线辐射的处理，不仅卫生还能在较长时间内保鲜。

天然放射性同位素在生命科学、考古科学方面得到较为广泛的应用。

**加速器** 用人工的办法加速带电粒子，使其获得很高速度的装置。加速器利用一定形态的电磁场将电子、质子或重离子等带电粒子加速，使其具有高达几千、几万乃至接近光速的高速带电粒子束，是人们认识原子核和探讨基本粒子，对物质深层结构进行研究的重要工具。同时随着加速器技术的不断发展，各种新的技术、新的原理不断更新，不断突破，进一步促进新技术的向前推进。加速器的研究和发展同时带来在工农业生产、医疗卫生、国防建设等各方面的应用。

早在 20 世纪 20 年代，科学家们就探讨过许多加速带电粒子的方案，并进行过多次实验。其中最早提出加速原理的是 E. 维德罗。30 年代初高压倍加器、静电加速器、回旋加速器相继问世，研制者分别获得这一时期的诺贝尔物理学奖。这以后，随着人们对微观物质世界深层次结构的研究的不断深入，各个科学技术领域对各种快速粒子束的需求不断增长，提出了多种新的加速原理和方法，发展了具有各种特色的加速器。其中有电子感应加速器、直线加速器、强聚焦高能加速器、扇形聚焦回旋加速器。1956 年克斯特提出通过高能粒子束间的对撞来提高有效作用能的概念，导致了高能对撞机的发展。

几十年来，人们利用加速器发现了绝大部分新的超铀元素和合成上千种新的人工放射性核素，并对原子核的基本结构和其变化规律进行了系统深入的研究，促使了原子核物理学的发展和成熟，并建立新的粒子物理学科。近 20 年来，加速器的发展的应用使材料科学、表面物理学、分子生物学、光化学都有重要发展。

我国加速器的发展始于 50 年代末期，先后研制和生产了高压倍加器、静电加速器、电子感应加速器、电子和质子直线加速器、回旋加速器。近年来更加先进的加速器在我国又取得重大进展，北京已建成正负电子对撞机，使我国加速器的研制和应用进入了世界先进行列。

**云室** 显示能导致电离的粒子径迹的装置。是最早的带电粒子探测器，是 C.T.R. 威耳孙 1896 年提出的，故称威耳孙云室。它的原理是：射出云室的高能粒子引起的离子在过饱和蒸汽中可成为蒸汽的凝结中心，围绕着离子将生成微小的液滴，于是粒子经过的路径上就出现一条白色的雾，在适当的照明下就能看到或拍摄到粒子运动的径迹，根据径迹的长短、浓淡以及在磁场中弯曲的情况，就可分辨粒子的种类和性质。云室的下底是可上下移动的活塞，上盖是透明的，一小块放射性物质（放射源）放在室内侧壁附近。实验时，在室内加适量酒精，使室内充满酒

精的饱和蒸汽。然后使活塞迅速下移，室内气体由于迅速膨胀而降低温度，于是饱和蒸汽沿粒子经过的路径凝结，显示出粒子运动的径迹。

威尔孙于 1911 年拍摄得世界上第一张  $\alpha$  粒子的径迹照片，后他又不断改进云室技术，由于云室的工作而获得 1927 年诺贝尔物理学奖。

由于云室灵敏时间短，工作效率低等原因，在核物理实验中已很少应用。但在高能物理，特别是在宇宙射线研究中，膨胀云室仍不失为一种有用的探测工具。

**宇宙射线** 来自宇宙空间的各种高能粒子流。这些粒子流源于各种天体过程，如太阳表面的高能活动，超星体爆炸，脉冲星及其它恒星的高能活动等。通常把进入大气层以前的宇宙线叫初级宇宙线，把初级宇宙线进入大气以后与大气中原子核作用而产生的射线叫次级射线。现在已知初级宇宙线中绝大多数是带正电的质子和  $\alpha$  粒子，还有少量的氮、氧、氦、硅、铁等较重的原子核和少量电子。这些粒子具有很高的能量（平均为 200 兆电子伏特，最高可达  $10^{21}$  电子伏特），它们进入大气后与大气中的原子核发生作用使宇宙线成为天然实验室，许多高能粒子就是在宇宙线中首先发现的。由于宇宙线是高能天体的产物，因此宇宙线的研究引起了人们的极大兴趣。

**原子能发电** 利用较重的原子核（如铀核、钚核）裂变成较轻原子核的过程中释放的能量通过一定的装置转变为电能的过程。又称核能发电。目前，包括我国在内的世界上大多数先进国家和地区已相继建成了数百座原子能发电站。

原子能发电站又称核电站，其关键设备是核反应堆，它相当于火电站的锅炉，受控的链式反应就在这里进行。核反应堆有多种类型，使用最广泛的是轻水堆和重水堆，轻水堆又分压水堆和沸水堆。

压水堆核电站以低浓铀作燃料，以在一回路中流动的高压不沸腾水作冷却剂兼慢化剂。在压水堆中，核燃料被制成燃料棒，集束组合成燃料元件，紧密排列形成堆心。运行时，核裂变放出的中子飞入慢化剂（水）减速为热中子，再飞回核燃料内引起裂变。冷却剂（水）吸收核裂变释放的能量，沿一回路流出堆外，在蒸汽发生器中把能量传给二回路水，使其变成高温高压蒸汽，推动汽轮发电机发电。反应速度由控制棒控制，它由能强烈吸收中子的材料如镉和硼做成，通过调节控制棒插入堆心的深度实施控制。

1942 年 12 月 2 日，第一座核反应堆首次实现自持的链式反应，宣告人类社会进入了“原子能时代”。1954 年，第一座核电站建成。

原子能发电的能量密度大，燃料用量少，发电综合成本低，正常运行时对环境污染远比火力发电对环境的污染小，是一种较成熟的强大的新能源。由于采取多重保护、多道屏障、纵深设防的设计原则，核电站一般不会发生事故，特别是发生严重事故的可能性极小。

我国自行设计制造的第一座秦山核电站已投入运营。不久的将来，在我国广东、上海、辽宁等地还将陆续建设一批核电站。

**粒子的相互作用** 组成物质的粒子之间力的相互作用。所有相互作用可归结为四种，即强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和万有引力作用。四种作用的比较如下表：

名称	强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
相对强度	1	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-38}$
作用范围(米)	$10^{-15}$	米	$< 10^{-17}$	米
举例	核力	原子力	衰变	天体力
被作用粒子	夸克	带电或带磁的一切物体	强子轻子	一切物体
媒介子	色胶子	光子	中间玻色子	引力子

科学家正在对这四种基本的相互作用进行深入的研究，很有可能把强作用、弱作用和电磁作用统一起来。

**夸克模型** 即层子模型。一种强子的基本结构。基本粒子的种类很多，又能互相转化，这就促使人们进一步研究基本粒子的结构，并提出了关于基本粒子的假设。这种理论认为：强子（包括介子和重子）是由更深一层次的层子（又叫夸克）构成的。层子有几种，所带电荷可能是基本电荷的  $1/3$  或  $2/3$ 。介子由一个层子和一个反层子构成，重子由三个层子构成，反重子由三个反层子构成。强子是由层子通过超强作用结合成的束缚态。强子参与的相互作用过程实质是由构成强子的层子参与的相互作用过程。夸克模型解释了许多实验事实，因此它提出后受到人们的重视。目前这一理论仍在不断发展，但至今仍未能在实验中找到单独存在的夸克（层子）。

巴耳末(1825 ~ 1898)瑞士数学家和物理学家。1849 年获博士学位，一生主要从事中学教学。他长期致力于原子光谱线的研究。1884 年在巴塞尔自然科学协会的演讲中，他公布了一个关于氢光谱波长的经验公式，形式如下：

$$H = \frac{m^2}{m^2 - n^2} \cdot h$$

其中 H 表示氢原子光谱线的波长， $h = 3645.6 \times 10^{-7} \text{mm}$ ， $n = 2, m = 3, 4, 5$ ，等整数，这就是有名的巴耳末公式。由此计算得到的可见光谱的波长和实验值的误差小于 4 万分之一。后来别人推广了巴耳末公式，把 2 换成其它正整数，公式就表示氢原子的其它线系的波长值。这些线系的存在后来为实验所证实，它们存在于氢原子光谱的紫外域和红外域。如  $n = 1$  为赖曼系， $n = 3$  为帕邢系， $n = 4$  为布喇开系等，而  $n = 2$  叫做巴耳末系。

巴耳末公式对原子光谱学和原子理论的发展起了重大的推动作用。

**汤姆孙**(1856 ~ 1940) 英国物理学家。他一生从事物理研究工作，并取得重大科研成果，为开辟近代物理学新领域做出重大贡献。1908 年获诺贝尔物理学奖。

汤姆孙最重要的贡献是发现电子。当时低压气体放电现象引起许多物理学者的兴趣。汤姆孙提出阴极射线可能是质量和线度小于原子的粒子射线的设想。为了证实这个假想和弄清楚这些粒子的物理性质，汤姆孙做了一个决定性的实验。他测定阴极射线受一定强度磁场作用弯折后所显示的曲率半径。另外采用静电偏转力与磁场偏转力相抵消的方法确

定粒子的速度，由此得到粒子的荷质比  $e/m$  约为氢离子的  $e_H/m_H$  值的 2000 倍。根据这种粒子的电荷  $e$  与氢离子的电荷  $e_H$  相同，其质量  $m$  微小程度是显而易见的，而且对于固体物质它有一定的穿透力，可见这种粒子的线度也是极小的。汤姆孙还进一步发现，不论阴极射线管内的剩余气体是何种气体，电极是什么材料制成的， $e/m$  值都相同。这就令人深信，这种带负电的粒子是组成一切原子的基本微粒。当时汤姆孙把这种粒子叫微粒，后人把它命名为电子。电子的发现为人类探索原子内部结构开辟了新的领域。

汤姆孙的另一个重要贡献是发明了研究极隧射线时发展起来的质谱方法，后经改进发展成为今天的质谱仪。并第一次用物理方法分离出同位素。

薛定谔(1887~1961) 奥地利物理学家，波动力学的创始人。

薛定谔于 1910 年毕业于维也纳大学并获得博士学位。毕业后他先后在大学和科学院从事物理研究工作。从 1925 年下半年起，他在 A. 爱因斯坦关于单原子理想气体的量子理论和 L.V 德布罗意的物质波假说的启发下，从经典力学和几何光学间的类比，提出了相应于波动光学的波动力学方程。他在 1926 年初先后发表了 4 篇论文，系统地阐明了波动力学理论，奠定了波动力学的基础。为此，他与 P.A.M. 狄喇克共同获得 1933 年的诺贝尔物理学奖。

薛定谔在晚年特别热衷的是把爱因斯坦的引力理论推广为一个统一场论，但也没有取得成功。

薛定谔对哲学和生命科学有着浓厚的兴趣。先后著有《科学和人文主义——当代的物理学》和《生命是什么？——活细胞的物理面貌》。后者使他成为今天蓬勃发展的分子生物学的先驱。

玻尔(1885~1962) 丹麦著名的理论物理学家，哥本哈根学派的创始人。玻尔于哥本哈根大学毕业后，先后在英国剑桥大学和曼彻斯特大学从事科学研究工作和学术领导工作，是 E. 卢瑟福的高材生。从 1912 年到退休为止，玻尔除在科学研究中作出重大贡献外，还积极倡导学术中心，热心培养发现人才，使他成为卓越的科学工作领导者和组织者，是青年科学工作者的良师益友。玻尔在科学研究上的重大贡献有：在普朗克量子假说和卢瑟福原子行星模型的基础上，于 1913 年发表了不朽的长篇论著《论原子结构和分子结构》，由此建立起来的原子的量子论，首次打开了人们认识原子结构的大门，开辟了近代物理发展的广阔前景。玻尔的理论对氢原子光谱的频率规律作了圆满的解释。1918 年玻尔又提出对应理论，结合他人的研究成果，对各种元素的光谱、X 射线谱等都作了相对合理的理论诠释。玻尔的这些成就使他获得 1922 年的诺贝尔物理学奖。于 1927 在分析量子力学的哲学涵义的基础上提出了“互补原理”，指出了物理领域中的变化如何深刻地影响了人们科学观的观点。玻尔认为，各种实验取得的数据不能纳入单一图景，只能认为是互相补充构成现象的总体。这个原理为科学家们普遍接受。1936~1939 年玻尔为了说明原子核裂变的机理，提出和改进了原子核结构的液滴模型，为这一领域的理论研究奠定了基础。

玻尔同时又是一位卓越的科学研究工作的组织者和领导者。1921 年创建了哥本哈根大学理论物理研究所，先后造就了一批出色人才，其中

有 10 名曾获诺贝尔物理学奖。成为举世闻名的“哥本哈根学派”。

玻尔一生爱好和平，崇尚民主，反对侵略，先后得到各国政府和学术团体授予的许多荣誉和头衔。玻尔曾访问过中国，同中国人民建立了十分友好的情谊。

**居里夫妇** 指世界科学史上两对著名的科学家。他们是皮埃尔·居里和玛丽居里夫妇，约里奥居里夫妇。

皮埃尔·居里(1859~1906)法国物理学家和化学家。玛丽·居里(1867~1934)法国物理学家和化学家。后者就是人们常称的居里夫人。两人于 1895 年结婚，婚后共同致力于放射性物质的探索与研究，相继发现钋、镭，并发现它们也具有放射性。他们发现相同质量的镭比铀的放射性大 200 万倍。为此于 1903 年与贝可勒尔共同获诺贝尔物理学奖。1906 年 P·居里去世后，居里夫人继续从事放射性物质的研究。1910 年她的重要著作《放射性》一书出版。同年她在 A.L.德比埃的协作下，提炼出金属态镭并确定镭的原子量及其在元素周期表中的位置。为此，居里夫人于 1910 年获得诺贝尔化学奖，使她成为第一个两次获得诺贝尔奖的人。居里夫人忘我的献身精神、严格的科学态度及她的巨大成就，受到世界科学界的广泛崇敬。元素周期表中的 96 号元素镅(Cm)，就是为纪念她和她的丈夫而命名的。

约里奥·居里 F·(1900~1958)是居里夫人的女婿，约里奥·居里 I·(1897~1956)是居里夫人的女儿。他们于 1926 年结婚，都是法国著名的物理学家。他们在原子核物理学方面有着重大贡献。1932 年他们合作，用放射性元素钋所产生的  $\alpha$  射线轰击铍、锂、硼等轻元素，发现了前所未有的穿透极强的所谓铍辐射。同年经查德威克的研究，确定为中子。约里奥·居里夫妇最主要的贡献是发现人工放射性。1934 年，他们用  $\alpha$  粒子轰击铝时首次产生了人工放射性元素，经化学分析证明为天然不存在的磷( ${}_{15}^{30}\text{P}$ )，它放出正电子( ${}_{1}^0\text{e}$ )进行  $\beta^+$  衰变，成为稳定的元素硅( ${}_{14}^{30}\text{Si}$ )。他们用  $\alpha$  粒子轰击硼和镁，最后也得到稳定的碳( ${}_{6}^{13}\text{C}$ )和铝( ${}_{13}^{27}\text{Al}$ )。这个发现十分重要，它表明，放射性同位素可以人为产生，即用  $\alpha$  粒子轰击稳定元素，生成不稳定的放射性同位素，这种不稳定的元素放出某种粒子(电子、正电子、 $\alpha$  射线)后，衰变成另一种稳定的元素。这一重大发现，使夫妇俩获得 1935 年的诺贝尔化学奖。成为世界知名的物理学家。

